



ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA HIDRATAÇÃO COMPLEMENTAR  
NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE PELOTAS  
AUTORREDUTORAS

Felippe de Oliveira Sousa

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de  
Engenharia Metalúrgica da Escola Politécnica,  
Universidade Federal do Rio de Janeiro, como  
parte dos requisitos necessários à obtenção do  
título de Engenheiro.

Orientadora: Giselle de Mattos Araújo

Rio de Janeiro

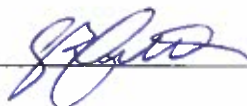
Agosto 2013

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA HIDRATAÇÃO COMPLEMENTAR NAS  
PROPRIEDADES MECÂNICAS DE PELOTAS AUTORREDUTORAS.

Felippe de Oliveira Sousa

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO  
DE ENGENHARIA METALÚRGICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE  
ENGENHEIRO METALURGISTA.

Examinado por:



Profª. Giselle de Mattos Araújo, D.Sc. - Orientadora



Prof. Achilles Junqueira Bourdot Dutra, Ph.D.



Prof. José Adilson de Castro, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

AGOSTO de 2013

Sousa, Felipe de Oliveira

Estudo da influência da hidratação complementar nas propriedades mecânicas de pelotas autorredutoras / Felipe de Oliveira Sousa - Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2013. x, 30 p.: il.; 29,7cm

Orientadora: Giselle de Mattos Araújo

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Metalúrgica, 2013.

Referencias Bibliográficas: p. 58-60

1. Pelotas Autorredutoras
2. Hidratação
3. Cura a frio
4. Propriedades Mecânicas

I. Araújo, Giselle de Mattos. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Engenharia Metalúrgica. III Estudo da influência da hidratação complementar nas propriedades mecânicas de pelotas

*“O sucesso consiste em ir de fracasso em fracasso sem perder o entusiasmo”*

*Winston Churchill*

*Dedico este trabalho aos meus pais,*

*José Carlos e Mabel.*

## **Agradecimentos**

A Deus pela minha vida.

Aos meus pais, José Carlos e Mabel, e a minha irmã Alinne, pelo apoio incondicional em todas as escolhas da minha vida, além do amor, incentivo, dedicação e esforço para que esse sonho se tornasse realidade. Essa conquista é nossa!

À minha orientadora Giselle Matos, que esteve sempre disposta a ajudar, pela paciência e pela confiança depositada em mim.

Ao Prof. Luis Marcelo, responsável pelo Laboratório de Tecnologia Mineral (LTM) da UFRJ, pelo espaço cedido e pela ajuda dos seus funcionários, especialmente ao Rangler e ao Pedro Porto.

Ao técnico Marcos Silva do laboratório multi usuários da Metalmat pela imensa ajuda nos testes de compressão.

Ao LNDC, pela realização dos ensaios de microdureza, especialmente ao meu amigo Gustavo Balderramas.

Aos amigos Metalmat underground, que levarei para vida toda, por dividirem comigo todos esses anos.

À minha namorada Isadora, pelo amor e pelo incentivo.

Aos professores do DEMM/UFRJ pelos ensinamentos profissionais ao longo da graduação.

A todos meus amigos de infância, professores, familiares e pessoas que passaram pela minha vida e que, de alguma forma, me ajudaram a me tornar uma pessoa melhor.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Metalurgista.

Estudo da Influência da Hidratação Complementar nas Propriedades Mecânicas de Pelotas Autorredutoras.

Felippe de Oliveira Sousa

Agosto/2013

Orientadora: Giselle de Mattos Araújo

Curso: Engenharia Metalúrgica

No presente trabalho investigou-se como diferentes meios e tempos de hidratação complementares em pelotas autorredutoras afetam suas propriedades mecânicas. Para tal, pelotas idênticas, de peso e tamanho controlados, foram confeccionadas manualmente pela adição de pellet feed, finos de carvão não coqueificado, cimento e cal. Essas pelotas foram divididas em diversos grupos que foram submetidos a hidratações por imersão ou em câmara úmida por tempos distintos. Um grupo não hidratado serviu como referência para a avaliação do efeito da hidratação. As pelotas então foram caracterizadas por meio de ensaios mecânicos de compressão e tamboramento. Os resultados comprovaram as expectativas de aumento na resistência a compressão das pelotas, e definiram o meio de hidratação por câmara úmida sendo mais eficiente que por imersão.

*Palavras-chave:* Pelotas Autorredutoras, Hidratação, Cura a frio, Propriedades Mecânicas.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for degree of Metallurgical Engineer.

Study of the influence of complementary hydration on the mechanical properties of self-reducing pellets

Felippe de Oliveira Sousa

August/2013

Advisor: Giselle de Mattos Araújo

Course: Metallurgical Engineering

This study has investigated how different ways and time of complementary hydration affects the cold strength of self-reducing pellets. Identical pellets, with weight and size controlled, were made manually by the addition of pellet feed, coal, cement and lime. These pellets were divided into several groups that have been subjected to hydration by water immersion or in a moist chamber, for different periods. A group of non-hydrated pellets was used as reference for evaluation the effect of hydration. The pellets were then characterized by mechanical tests of compression and tumbling strength. The results have shown an increase in the mechanical properties of pellets and have proved that the means of hydration by moist chamber was more efficient than by water immersion.

Keywords: Self-reducing pellets, Hydration, Green Strength, Mechanical Properties.

## ÍNDICE GERAL

1. Introdução .....	1
2. Revisão Bibliográfica.....	2
2.1. Matérias primas para redução.....	2
2.1.1 Fontes Ferríferas.....	2
2.1.2 Fontes Carbonáceas.....	5
2.1.3 Fundentes.....	7
2.1.4 Aglomerado Autorredutor.....	8
2.2 Cimento.....	9
2.2.1 Cura do cimento.....	11
2.3 Uso do aglomerado Autorredutor.....	17
2.3.1 Fundamentos da Autorredução.....	17
2.3.2 Processos de Autorredução.....	18
2.3.3 Estados da Arte.....	21
3. Materiais e métodos.....	27
3.1 Composição das pelotas autorredutoras.....	27
3.2 Cura a frio.....	31
3.3 Ensaio mecânicos.....	34
3.3.1 Ensaio de Tamboramento.....	34
3.3.2 Ensaio de compressão a frio.....	35
3.3.3 Ensaio de Microdureza.....	36
4. Resultados e Análise.....	38
4.1 Compressão a frio.....	38
4.2 Ensaio de Microdureza.....	47
4.3 Ensaio de Tamboramento.....	48



5. Conclusões.....	57
6. Referências Bibliográficas.....	58

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Minério Granulado (Extraído de [1]).....	3
Figura 2 – Aspecto de pelotas aglomeradas a quente (Extraído de [9] ).....	5
Figura 3 – Representação de uma pelota autorredutora (Extraída de [4]).....	8
Figura 4 – Resistência a compressão versus tempo de cura do cimento (Extraído de [5]).....	11
Figura 5 – Estrutura aberta do tri-cálcio silicato ( $C_3S$ ) (Extraído de [8]).....	15
Figura 6 – Estrutura compacta do di-cálcio silicato ( $C_2S$ ) (Extraído de [8]).....	15
Figura 7 – Evolução da resistência à compressão com o tempo de cura (Extraído de [5]).....	16
Figura 8 – Relação de resistência a compressão com o teor de cimento. (Adaptada de [8]).....	17
Figura 9 – Forno TECNORED® para fusão redutora (Adaptado de [2]).....	19
Figura 10 – Tempo de processamento no Alto Forno e no processo TECNORED® (Extraído de [13]).....	20
Figura 11 – Processo Itmk3 para autorredução. Adaptado de [13].....	20
Figura 12 – Curvas de fração reduzida x tempo por diferentes autores e condições (Adaptado de [24]).....	22
Figura 13 – Fração reduzida x tempo para diferentes temperaturas em pelotas com e sem cimento (Adaptado de [24]).....	25
Figura 14 – Sequência de etapas para confecção das pelotas autorredutoras.....	31
Figura 15 – Pelotas imersas em água.....	33
Figura 16 – Câmara úmida utilizada para hidratação das pelotas.....	33
Figura 17 - Representação do movimento das pelotas num ensaio de tamboramento (Extraída de [22]).....	34
Figura 18 - Prensa EMIC utilizada no ensaio de compressão a frio.....	35
Figura 19 - Representação esquemática das pelotas inteiras e lixadas pela metade.....	36

Figura 20 – Pelota embutida a frio.....	37
Figura 21 - Medição de microdureza.....	37
Figura 22 – Medição do diâmetro da pelota.....	37
Figura 23 – Pelotas curadas por 28 dias sem hidratação complementar.....	39
Figura 24 – Pelotas imersas em água por 10 minutos.....	39
Figura 25 – Pelotas imersas por 10 minutos, curadas por 3 dias e novamente imersas por 10 minutos.....	40
Figura 26 – Pelotas imersas em água por 20 minutos.....	40
Figura 27 – Pelotas imersas em água por 30 minutos.....	41
Figura 28 – Comparação dos resultados entre os tipos de pelotas – Imersão.....	41
Figura 29 – Média de resistência por tipo de pelota – Imersão em água.....	42
Figura 30 – Pelotas hidratadas em câmara úmida por 1 dia.....	44
Figura 31 – Pelotas hidratadas em câmara úmida por 2 dias.....	44
Figura 32 – Pelotas hidratadas em câmara úmida por 5 dias.....	45
Figura 33 – Pelotas hidratadas em câmara úmida por 7 dias.....	45
Figura 34 – Comparação dos resultados entre os tipos de pelotas – Câmara úmida.....	46
Figura 35 – Média de resistência por tipo de pelota – Câmara úmida.....	46
Figura 36 – Comparação entre todos os tipos de pelotas produzidas.....	48
Figura 37 – Tempo transcorrido desde a confecção aos ensaios.....	49
Figura 38 – Pelotas antes do ensaio de tamboramento.....	50
Figura 39 – Microdureza através do raio das pelotas.....	51
Figura 40 - Pelotas após tamboramento – Base.....	51
Figura 41 - Pelotas após tamboramento – Imersão 10 minutos (tipo I).....	42
Figura 42 – Pelotas após tamboramento – Imersão 20 minutos (tipo II).....	52
Figura 43 – Pelotas após tamboramento - Imersão 20 minutos (tipo III).....	53
Figura 44 – Pelotas após tamboramento – Imersão por 30 minutos (tipo IV).....	53
Figura 45 – Pelotas após tamboramento – Câmara úmida 1 dia (tipo I).....	54

Figura 46 – Pelotas após tamboramento – Câmara úmida 2 dias (tipo IV).....	54
Figura 47 – Pelotas após tamboramento – Câmara úmida 5 dias (tipo III).....	55
Figura 48 – Pelotas após tamboramento – Câmara úmida 7 dias (tipo IV).....	55

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química do cimento (Extraído de [5]).....	10
Tabela 2 – Componentes do Cimento Portland (Extraído de [5]).....	12
Tabela 3 – Relação dos autores das curvas mostradas na figura 12.....	23
Tabela 4 – Composição química do pellet-feed utilizado.....	28
Tabela 5 – Distribuição granulométrica do pellet-feed utilizado.....	28
Tabela 6 – Composição química do cimento Portland ARI.....	28
Tabela 7 – Composição química típica da cal hidratada.....	29
Tabela 8 – Configuração geométrica das pelotas.....	29
Tabela 9 – Massa dos constituintes utilizados na mistura autorredutora.....	29
Tabela 10 – Percentagem de constituintes em cada pelota.....	29
Tabela 11 – Tipos de pelotas produzidas.....	33
Tabela 12 – Comparação dos valores para pelotas hidratadas por imersão em água.....	43
Tabela 13 - Comparação dos valores para pelotas hidratadas por câmara úmida.....	46

## 1. INTRODUÇÃO

O setor Siderúrgico vem passando nos últimos anos por um processo de reestruturação, onde a busca por processos mais eficientes, melhor uso de matérias-primas e o respeito a legislação ambiental ganham cada vez mais importância.

A forte competição entre as empresas do setor Siderúrgico, e também o aumento do rigor da legislação ambiental, fez com que surgissem diferentes rotas de produção de aço, a liga metálica de maior importância e uso mundial, com processos distintos e de características peculiares, embora com iguais objetivos: maior produtividade a um menor custo respeitando os requisitos ambientais [23].

Dentre os processos alternativos de produção de aço utilizando minério de ferro, o uso de aglomerados autorredutores vem ganhando destaque.

A autorredução permite o aproveitamento de minérios de ferro de granulometria muito fina e carvões diversificados, que são aglomerados a frio com auxílio de algum aglomerante, como cimento, por exemplo. Aliado ao aproveitamento de matérias-primas mais baratas e resíduos metalúrgicos, a cinética de redução dessas pelotas apresenta uma vantagem comparada a cargas de minério como sinter e pelotas aglomeradas a quente, pois os gases são gerados no interior da própria pelota, estando em contato com a carga a ser reduzida, diminuindo assim o tempo total de redução.

Para utilização de pelotas autorredutoras em processos de produção de ferro primário, propriedades mecânicas devem ser atingidas para que não haja degradação excessiva durante o transporte, manuseio e na sua utilização propriamente dita. Parâmetros como resistência a compressão e a abrasão, por exemplo, podem ser utilizados para caracterizar o comportamento dessas pelotas e viabilizar seu uso em grandes reatores metalúrgicos, ou simplesmente evitar multas contratuais [19].

As pelotas autorredutoras estudadas no presente trabalho foram confeccionadas manualmente pela adição de minério de ferro, carvão não-coqueificado, cimento Portland ARI(Alta resistência inicial), cal e água. As pelotas foram confeccionadas pelo mesmo método e apresentavam peso e tamanho médio iguais.

As pelotas foram submetidas a diferentes meios e tempos de hidratação complementar, com objetivo de avaliar o ganho em suas propriedades mecânicas. Para efeito de comparação, um grupo de pelotas foi produzida sem hidratação complementar, e os outros tipos foram hidratados por imersão em água, onde variou-se o tempo de imersão. Outro grupo foi hidratado em uma câmara úmida de temperatura e umidade controlada, onde também foi variado o tempo de residência das pelotas na câmara. Para comparação dos efeitos da hidratação complementar das pelotas, foram utilizadas técnicas de ensaio por tamboramento e compressão a frio.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### **2.1. Matérias-primas para redução**

O processo de obtenção de ferro gusa para posterior produção de aços necessita, independente da rota de processamento utilizada - fusão redutora em alto-fornos, redução direta ou autorredução – de matérias primas, que podem ser divididas em fontes feríferas, fontes carbonáceas e eventuais fundentes, aglomerantes ou fluxantes.

#### **2.1.1 Fontes Ferríferas**

O Ferro é um dos elementos mais abundantes da crosta terrestre e é encontrado na natureza na forma de carbonatos, sulfetos, silicatos e óxidos, sendo os óxidos os mais

importantes para siderurgia [1]. Os principais minérios de ferro encontrados na natureza são: Hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), Magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), Goethita ( $\text{FeO}\cdot\text{OH}$ ), Limonita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot n\text{H}_2\text{O}$ ), Siderita ( $\text{FeCO}_3$ ), Pirita ( $\text{FeS}_2$ ) e a Ilmenita ( $\text{FeTiO}_2$ ).

As fontes de ferro usadas para obtenção de ferro gusa por processos de fusão redutora em alto-fornos podem ser divididas em minério granulado, sinter, pelotas e pelotas autorredutoras, sendo estas últimas ainda em fase de avaliação [14,15,16].

O Granulado ou *Lump Ore* é um tipo de minério rico em ferro e que não demanda um processo de aglomeração como os sinters ou pelotas, necessitando apenas de ajuste da granulometria adequada a sua utilização, que é obtido por processos de britagem e/ou moagem seguido de classificação em peneiras. O minério granulado possui qualidade metalúrgica inferior ao sinter e pelotas, porém seu custo é menor.



Figura 1 – Minério Granulado - Extraído de [1].

O sinter é um tipo de carga ferrífera advinda do processo de sinterização, que consiste em aglomerar por meio de fusão localizada uma mistura composta de finos de minério de ferro, carvão ou coque, fundentes, sinter de retorno e água.

O processo de sinterização confere características adequadas aos sinteres que serão utilizados posteriormente na redução e consegue aproveitar os finos de minérios



de ferro que seriam descartados. Entretanto sua produção gera custos adicionais a produção de ferro gusa, e as regulamentações do setor tem se tornado cada vez mais rígidas com a questão ambiental da produção de sinteres, devido aos gases poluentes gerados no processo.

Na unidade de sinterização, uma camada de síter é depositada sobre uma grelha que passa por um ignitor de combustão, fazendo com que a carga comece a queimar pela combustão da fonte carbonácea. Exaustores succionam o ar através do leito da mistura e o coque ou carvão queimado fornece o calor que funde parcialmente a carga e aglomera as partículas, conferindo-lhes a desejada resistência mecânica.

A temperatura na frente de combustão precisa ser controlada e estar entre 1300°C e 1400°C, pois baixas temperaturas resultam em sínteres menos resistentes mecanicamente e sobre temperaturas acarretam fusão exagerada e perda da permeabilidade da carga.

Ao final do processo, o sinter é descarregado, quebrado, resfriado e peneirado. Os finos gerados podem ser reutilizados após serem capturados pelo sistema de sucção de ar e o produto final está pronto para ser usado na redução.

As propriedades metalúrgicas de redução do síter são superiores aos do minério granulado, o que justifica seu custo mais elevado. Além disso, o minério granulado, com propriedades adequadas a utilização, é cada vez mais escasso de ser obtido, e o síter permite o aproveitamento de granulometrias mais finas das minas de minério de ferro.

Pelotas são outro tipo de carga ferífera compostas por finos de minério, água, finos de coque e eventualmente aglutinantes. Se comparado ao minério granulado e ao síter quanto ao tempo de uso da técnica pode ser considerado a mais recente [2]. Sua produção pode ser dividida em 4 passos.

O 1º passo é a formação de pelotas verdes, onde minérios muito finos, à qual poderão ser adicionados finos de coque (máximo de 1%) são misturados [2]. A mistura é pré-aglomerada em pelotas denominadas verdes em discos ou tambores rotativos. Neste passo, água e um aglutinante são adicionados a mistura. Conforme a pelota gira no tambor as partículas vão se aderindo pois uma fina camada de água é formada na superfície da partícula de minério, permitindo formar uma ponte de água com outra partícula.

O passo 2 é composto pela secagem, onde a água de ligação é substituída por um aglomerante químico que pode ser mineral (bentonita) ou orgânico [2]. As pelotas são aquecidas a temperaturas entre 300 e 350 °C.

O 3º passo é a queima, também chamada de “endurecimento”. As pelotas secas são aquecidas a uma temperatura de 1250 a 1350 °C e o calor necessário a essa etapa vem dos queimadores e da queima dos finos de coque adicionados. [2].

Por fim faz-se o resfriamento, processo de resfriamento controlado para evitar a degradação das pelotas levando as mesmas a temperatura ambiente.

A principal vantagem do uso de pelotas é o aproveitamento de granulometrias de minério de ferro ainda mais finas que o sinter e sua elevada porosidade, o que ajuda na percolação dos gases redutores pela carga nos alto-fornos, levando a maiores taxas de redução nos alto-fornos.

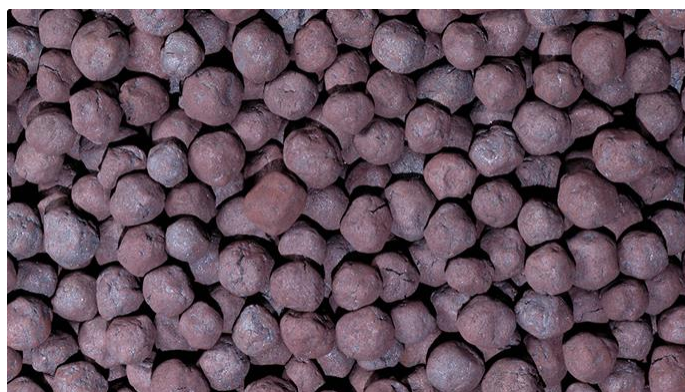


Fig. 2 – Aspecto de pelotas aglomeradas a quente – Extraído de [9].

### 2.1.2 Fontes Carbonáceas

O carbono é utilizado tanto como redutor quanto combustível na redução de óxidos de ferro para obtenção de ferro gusa e pode ser obtido, basicamente, de duas fontes: coque ou carvão vegetal.

O coque é o produto sólido resultante da pirólise de certos carvões betuminosos na ausência de oxigênio. Seu processamento na coqueria têm como objetivo a retirada de material volátil, impurezas, aumento de sua porosidade e, principalmente, de sua resistência mecânica.

O carregamento nos fornos é composto por mistura de tipos de carvão coqueificáveis, geralmente entre 7 e 10 tipos [2]. O ciclo operacional da coqueria pode ser resumido nas seguintes fases:

- Preparação da mistura de carvões;
- Enfornamento;
- Aquecimento;
- Desenfornamento;
- Apagamento;
- Preparação de coque;
- Tratamento das matérias voláteis;

O ciclo térmico que a carga enfrenta pode ser dividido em 5 etapas: desgaseificação, amolecimento, inchamento, ressolidificação e contração. [2]

Na desgaseificação ocorre a evaporação da umidade, decomposição térmica do carvão e início da perda de voláteis. No amolecimento, o carvão mineral começa a amolecer e começam a surgir poros, que vão ser benéficos no processo de redução.

As propriedades desejadas do coque para uso na metalurgia são, principalmente: alta resistência à compressão, alta resistência ao choque, alta resistência ao atrito, boa reatividade e elevada porosidade.

O coque representa em torno de 50% do custo total das matérias-primas nos altos-fornos brasileiros [3], por isso justifica-se atenção especial ao seu papel no preço final do ferro gusa. Além disso, 95% do ferro primário produzido no mundo usa altos-fornos a coque [3]. O Brasil importa os carvões coqueificáveis da Austrália, Estados Unidos e Canadá e o principal problema causado pelo seu uso é no que diz respeito ao dano ambiental causado no seu apagamento, frequentemente utilizando água, onde gases tóxicos e poluentes como benzeno, tolueno e xileno que são altamente poluentes e tóxicos são lançados a atmosfera.

O carvão vegetal é obtido pela combustão, na ausência de oxigênio, de madeira ou lenha. As madeiras, em sua maioria, são provenientes do eucalipto, árvore que pode ser replantada o que configura uma fonte renovável de fonte carbonácea. Seu uso é restrito a altos-fornos pequenos, pois não possui boa resistência mecânica a compressão, o que acarretaria esmagamento da carga, geração de finos e perda de permabilidade dos gases. Em contrapartida, possui menor teor de enxofre e fósforo que o coque, o que facilita a produção de aço na aciaria e permite a obtenção de aços mais puros, de maior valor agregado.

### **2.1.3 Fundentes**

Os fundentes usados na fusão redutora tem a função de auxiliar a formação de uma escória com baixo ponto de fusão e fluida o suficiente para ser separada do ferro gusa. Os principais insumos usados como fundentes são  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$  e  $\text{SiO}_2$ . O calcário, carregado nos altos fornos, pode ser usado no estado bruto ou já calcinado. A escória gerada com o auxílio do uso de fundentes é um sub-produto na produção de gusa e é usada como matéria-prima da indústria cimenteira.

### 2.1.4 Aglomerado Autorredutor

As pelotas verdes ou autorredutoras são produzidas misturando-se finos de minério de ferro, agente redutor – carvão vegetal ou coque -, aglomerante (cimento) e fluxantes, se necessários. O objetivo na produção das pelotas autorredutoras é produzir pelotas mais homogêneas e resistentes possível.

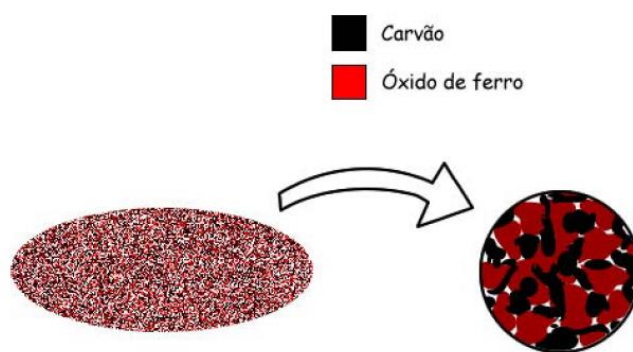


Fig. 3 - Representação de uma pelota autorredutora. Extraído de [4].

A técnica de autorredução permite aproveitar matérias-primas extremamente finas que seriam descartadas por se encontrarem em granulometria muito baixa, além de possibilitar uma velocidade de reação muito mais rápida visto que a carga carbonácea redutora se encontra em contato direto com a carga ferriífera que será reduzida. Outro fato benéfico no uso de pelotas é seu tamanho reduzido, que também aumenta a velocidade de redução.

## 2.2. Cimento

A palavra cimento é originada do latim *caementu*, que designava na Velha Roma, uma espécie de pedra natural de rochedos e não esquadrejada [5]. O cimento pode ser definido como um pó fino, com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que endurece sob a ação de água [5] .

O cimento Portland é composto por clínquer e adições. O clínquer é o principal componente, sendo obtido pela mistura de calcário e argila misturada, que atravessa um forno giratório de grande diâmetro e comprimento, cuja temperatura interna chega a alcançar 1450 °C. O intenso calor transforma essa mistura num novo material denominado clínquer, que ainda incandescente é resfriado rapidamente para ser finamento moído e transformado em pó.

As adições para obtenção do cimento são o gesso, as escórias de alto-forno, os materiais pozzolânicos e carbonáticos. O gesso tem a função de controlar o tempo de pega, isto é, o início do endurecimento do clínquer moído quando este entra em contato com a água. Sem adição do gesso o tempo de pega seria muito reduzido, ou seja, o cimento endureceria muito rápido em contato com a água, dificultando o seu uso. [5]

A escória de alto-forno, subproduto na produção de ferro gusa, possui característica de ligante muito resistente quando em presença de água, propriedade semelhante ao clínquer e que permitiu a adição da escória na produção de cimento. Além disso, sua adição provoca aumento na durabilidade do cimento e maior resistência final [5].

Os materiais pozzolânicos são rochas vulcânicas ou matérias orgânicas fossilizadas que possuem propriedade de ligante quando em contato com água e hidróxido de cálcio, este presente no clínquer.

Os materiais carbonáticos são rochas moídas que apresentam carbonato de cálcio e servem para tornar os concretos mais trabalháveis pois os grãos ou partículas desses materiais moídos têm dimensões adequadas para se alojar entre os grãos ou partículas dos demais componentes do cimento, funcionando como verdadeiro lubrificante.

Conforme é variado o tipo e a quantidade dos componentes mencionados, diferentes tipos de cimentos Portland são obtidos como: Cimento Portland Comum (CP I), Cimento Portland Composto (CP II), Cimento Portland de Alto-Forno (CP III), Cimento Portland Pozolânico (CP IV), Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI), Cimento Portland Resistente a Sulfatos (RS), Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação (BC) e Cimento Portland Branco (CPB).

O cimento de uso mais comum no mercado brasileiro é o cimento Portland Composto CP II, respondendo por aproximadamente 75% do mercado [5].

Tabela 1 – Composição química do cimento. Extraído de [5].

Tipo de cimento portland	Sigla	Composição (% em massa)				Norma Brasileira
		Clínquer + gesso	Escória granulada de alto-forno (sigla E)	Material pozolânico (sigla Z)	Material carbonático (sigla F)	
Comum	CP I	100	-			NBR 5732
	CP I-S	99-95	1-5			
Composto	CP II-E	94-56	6-34	-	0-10	NBR 11578
	CP II-Z	94-76	-	6-14	0-10	
	CP II-F	94-90	-	-	6-10	

Cada tipo de cimento responde ao tempo de cura de maneira diferente, mas como pode ser observado na Figura 5, invariavelmente, a resistência máxima a compressão é obtida após 28 dias de cura.

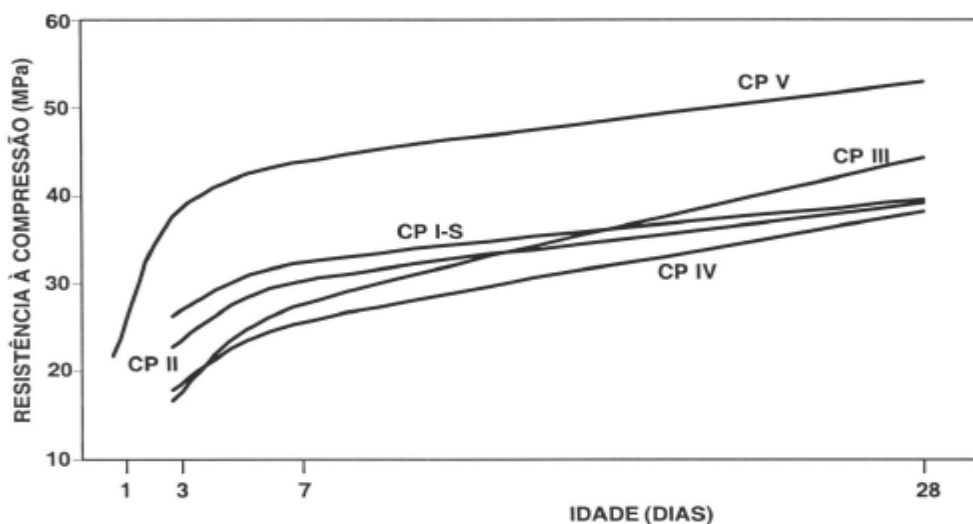


Fig. 4 – Resistência a compressão versus tempo de cura do cimento – Extraído de [5].

### 2.2.1 Mecanismo de cura das pelotas autorredutoras

A preparação das pelotas autorredutoras estudadas no presente trabalho, envolve a adição das matérias-primas já citadas, como pellet feed, carvão, cimento e fluxantes, além de água.

O papel da água nesse processo é muito importante devido ao seu efeito de capilaridade, que aglomera as matérias-primas e confere resistência inicial para que as pelotas sejam produzidas. Portanto, materiais hidrofílicos e com granulometrias reduzidas tendem a apresentar melhores propriedades mecânicas neste estágio.

O uso de cimentos Portland, material inorgânico, como ligante é preferível quando comparado ao uso de ligantes orgânicos, pois o primeiro apresenta melhores propriedades a altas temperaturas, sendo uma característica essencial e desejável visto que as pelotas serão submetidas a altas temperaturas na redução.



A cura de pelotas autorredutoras usando cimento em sua composição envolve uma reação de hidratação com a formação de um complexo de cálcio e silício hidratado tipo gel, assim como ocorre no concreto [6,7]. Existe também a reação de carbonatação, mas a mesma pode ser desprezada devido ao pequeno tempo de cura encarado pelas pelotas e dado ao fato das pelotas serem feitas numa atmosfera normal, que representa baixa pressão parcial de  $\text{CO}_2$  [6].

O cimento Portland é um material complexo que apresenta em sua composição química compostos que contêm cálcio, tais como silicatos, aluminatos e outros óxidos e sulfatos. A tabela 2 apresenta os mais importantes constituintes do mesmo [6]:

Tabela 2 – Componentes do Cimento Portland – Extraído de [5].

Óxido	Simbolo	Componente	Abreviação
CaO	C	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$
$\text{SiO}_2$	S	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$
$\text{Al}_2\text{O}_3$	A	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	F	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{AF}$
MgO	M	$4\text{CaO}.3\text{Al}_2\text{O}_3.\text{SO}_3$	$\text{C}_4\text{A}_3\text{S}'$
$\text{SO}_3$	S'	$3\text{CaO}.2\text{SiO}_2.3\text{H}_2\text{O}$	$\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$
$\text{H}_2\text{O}$	H	$\text{CaSO}_4.2\text{H}_2\text{O}$	$\text{CS}'\text{H}_2$

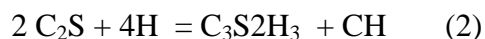
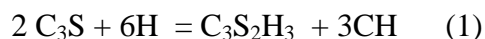
O processo de hidratação do cimento é bastante complexo e consiste em várias reações distintas com a água devido ao fato do material ser composto por diferentes componentes, como mostrado na Tabela 2. A taxa de hidratação vai depender desses componentes do cimento. Reações dos aluminatos de tri-cálcio ( $\text{C}_3\text{A}$ ), silicato de tri-

cálcio ( $C_3S$ ) e aluminato de tetra-cálcio ( $C_4A_3S'$ ) ocorrem mais rápido que as de dissilicato de cálcio ( $C_2S$ ), por exemplo [5,6].

Quando adicionamos água ao composto, a reação de hidratação dos aluminatos, que podem ser basicamente definidos como aluminato de tri-cálcio ( $C_3A$ ), é extremamente rápida, da ordem de minutos – o que deve ser considerado muito rápido, haja vista que o cimento cura completamente com 28 dias - e muito exotérmica, formando compostos hidratados como  $C_3AH_6$ ,  $C_4AH_{19}$  e  $C_2AH_{18}$  [6]. Conforme citado anteriormente, o gesso, formado basicamente por  $CaSO_4$  é adicionado para retardar essa cura muito rápida que inviabilizaria a utilização do cimento. O cimento Portland é formado por aproximadamente 5 a 15% de aluminato de tri-cálcio ( $C_3A$ ) e 5 a 15% de tetra-cálcio aluminato de ferrita ( $C_4AF$ ). Após a neutralização dos aluminatos pelo gesso, o silicato de tri-cálcio ( $C_3S$ ) assume a posição de principal componente a dar resistência mecânica durante a cura a frio [6].

Os silicatos estão presente no cimento Portland em proporção de aproximadamente 75%, onde entre 40 e 65% destes sendo silicato de tri-cálcio ( $C_3S$ ) e 10 a 35% de silicato de di-cálcio ( $C_2S$ )[7]. Esses silicatos participam ativamente na cura dos aglomerados com cimentos na reação de hidratação completa do silicato de tri-cálcio ( $C_3S$ ) que é a reação mais rápida e a do silicato de di-cálcio ( $C_2S$ ), mais lenta.

A reação de hidratação, quando completa, pode ser representada pelas seguintes reações [6]:



A reação de hidratação pode formar produtos mais complexos mas, baseado na teoria coloidal [7], é razoável admitir que a coesão entre as partículas é dada pela precipitação de um tipo de gel coloidal que endurece com a perda de água.

Pode-se, então, criar uma sequência cronológica que descreve a cura do cimento:

- 1) A cura inicial vai ocorrer com uma rápida reação, dentro de poucos minutos, seguida de um período de indução que leva entre 30 e 150 minutos para ocorrer. Durante esse período, um filme dos produtos hidratados é formado nas partículas de cimento e diminui a velocidade da hidratação de produtos coloidais.
- 2) A reação prossegue com a quebra do gel formado devido a diferença de pressão osmótica ditada pela diferença de concentração dos íons. Esse gel possui uma estrutura porosa e tende a alcançar uma fase termodinamicamente mais estável. Conforme os novos cristais de silicatos hidratados são formados as propriedades mecânicas dos aglomerados são melhoradas.

A diferença entre a estrutura dos cristais explica as taxas de reações de hidratações mencionadas acima entre os di-cálcios e tri-cálcios silicatos. A estrutura cristalina dos tri-cálcios silicatos ( $C_3S$ ) é mais aberta que as do di-cálcio silicato ( $C_2S$ ), como pode ser visto nas Figura 5 e 6, respectivamente. Além disso, os tri-cálcios silicatos ( $C_3S$ ) são termodinamicamente meta-estáveis a temperaturas abaixo de 1300 °C [8]. A temperatura ambiente, a cura dos aglomerados na primeira semana pode ser creditada a reação de hidratação dos tri-cálcios silicatos ( $C_3S$ ). Por outro lado, a estequiometria das reações, mostradas em (1) e (2), mostra que o  $C_3S$  da origem a 61% de  $C_3S_2H_3$  enquanto o  $C_2S$  da origem a 82% desse mesmo produto. Tal fato explica a

maior resistência obtida para longos períodos de cura (mais que 90 dias), usando cimentos contendo uma grande quantidade de  $C_2S$  em comparação a cimentos com o mesmo tipo de cimento contendo maiores teores de  $C_3S$  [10].

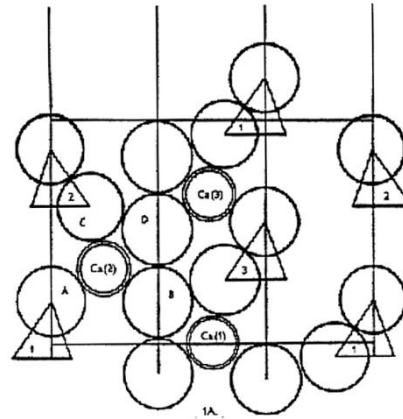


Fig. 5 – Estrutura aberta do tri-cálcio silicato ( $C_3S$ ) – Extraído de [8]

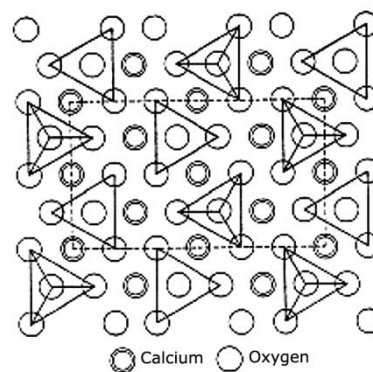


Fig. 6 – Estrutura compacta do di-cálcio silicato ( $C_2S$ ) – Extraído de [8]

A evolução da resistência a compressão típica de cura de pelotas autorredutoras pode ser observado na Figura 7. Durante os primeiros dias de cura, o elevado aumento nas propriedades mecânicas é devido a fácil hidratação dos componentes do cimento. Essa primeira fase pode ser definida como primeiro patamar. O segundo estágio do

aumento da resistência à compressão pode ser atribuído a maior hidratação do  $C_2S$ . A melhor resistência é alcançada normalmente dentro de 3 ou 4 semanas, como ocorre normalmente com o cimento [8].

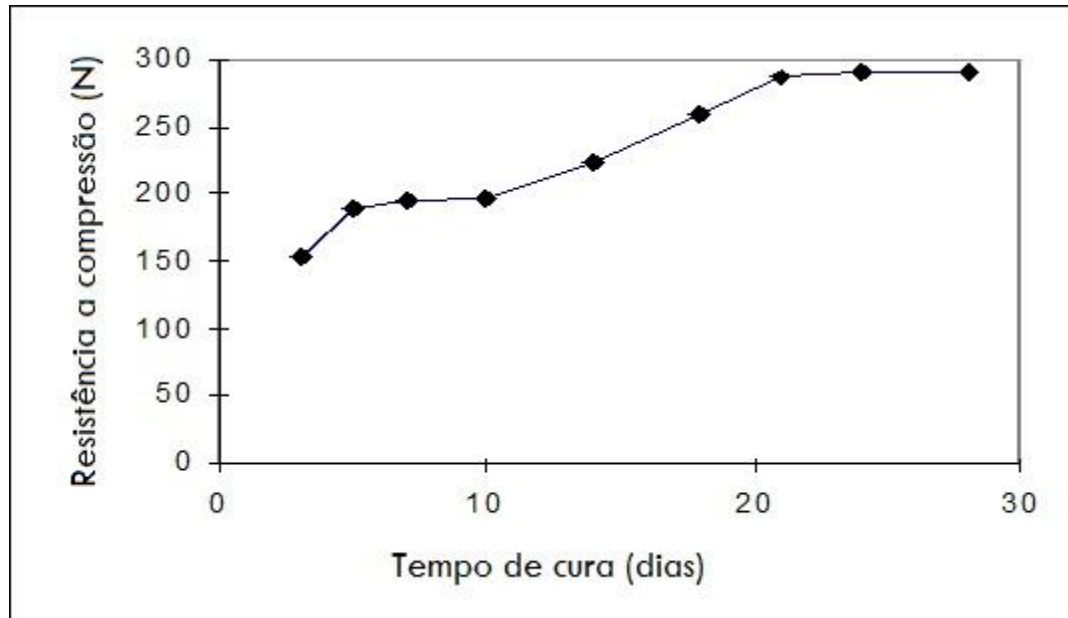


Fig. 7 – Evolução da resistência à compressão com o tempo de cura. Extraído de [5].

Como a reação de hidratação é favorecida pela alta pressão de vapor de água e a taxa é aumentada com o aumento da temperatura, o período de cura pode ser drasticamente reduzido pela cura em reator com vapor de água a temperatura de  $200^{\circ}\text{C}$  durante 1 hora [11].

Outro fato importante nas propriedades alcançadas pelo uso de cimentos na aglomeração a frio é a quantidade de cimento utilizado. Existe uma quantidade ótima de cimento para obtenção da melhor propriedade mecânica possível. Essa quantidade está relacionada a formação de uma camada sobre a superfície entre as partículas, e quantidades de cimento acima dessa quantidade, ou seja, que formam mais de uma camada sob as partículas, não aumentarão a resistência final do aglomerado [8]. Pela

Figura 8, observa-se que a máxima resistência à compressão é obtida para teores de cimento entre 6 e 8%, independente do tempo de cura.

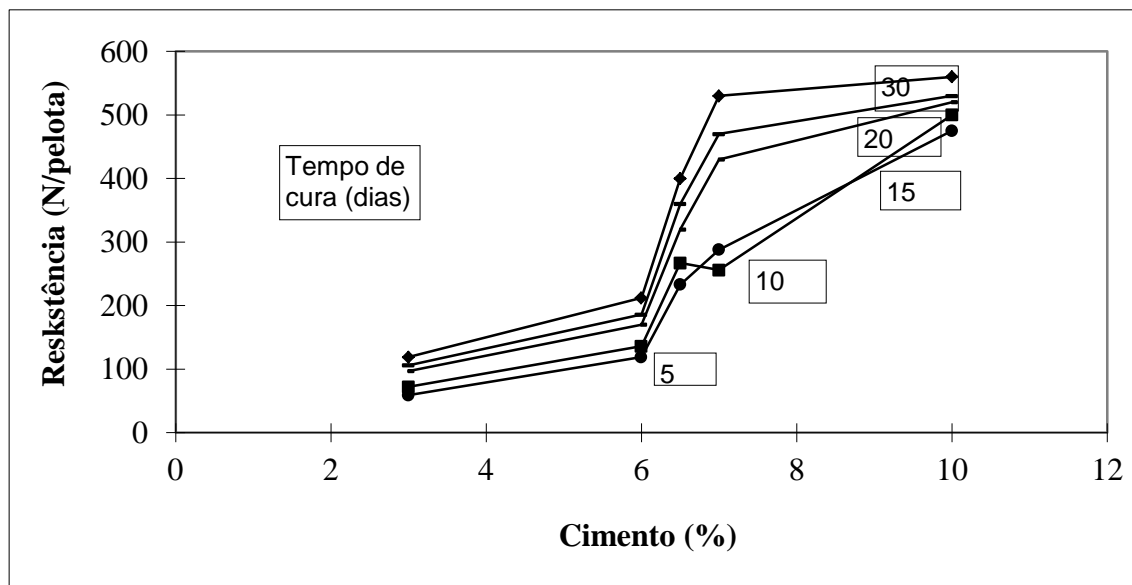


Fig. 8 – Relação de resistência a compressão com o teor de cimento. Adaptada de [8].

Outros aglomerantes podem ser usados no lugar do cimento ou em combinação com o cimento, como a cal. Quando a cal é usada e curada sob uma atmosfera rica em  $\text{CO}_2$  há formação de carbonato de cálcio [8]. A vantagem desse produto é que o mesmo se decompõe a temperaturas mais altas (acima de  $900^\circ\text{C}$ ) que os hidratos de cálcio (acima de  $650^\circ\text{C}$ ).

### 2.3. Uso do Aglomerado Autorredutor

#### 2.3.1 Fundamentos da autorredução

O desenvolvimento e uso das pelotas autorredutoras é um processo recente se comparado a outros tipos de cargas feríferas, e atualmente existem diversos processos

que fazem uso das mesmas, como por exemplo o Tecnored, Itmk3, Fastmet, Inmetco entre outros [9].

A principal vantagem em se utilizar pelotas autorredutoras compostas por minério de ferro e material carbonoso aglomeradas a frio é a taxa que a redução ocorre, uma vez que há grande proximidade entre os reagentes devido ao pequeno tamanho das pelotas [12]. A reação pode ser atingida em tempos variando de 5 a 10 minutos para temperaturas entre 1273 K e 1423 K.

Algumas vantagens podem ser destacadas pelo uso de pelotas autorredutoras em substituição aos processos tradicionais, dentre eles [12]:

- Maior flexibilidade no uso de matérias primas;
- Aproveitamento de frações finas de minério de ferro e de redutores;
- Maior velocidade de redução se comparado aos processos tradicionais;
- Proximidade entre minério a ser reduzido e o redutor por estarem agredados numa pelota, gerando grande área superficial disponível para as reações necessárias à redução ocorrerem;
- Os gases redutores são gerados no interior da pelota, eliminando a etapa de difusão destes gases do ambiente externo para o interno, como nos processos tradicionais;
- Maior pressão parcial de CO pela inexistência de gases inertes como o nitrogênio.

### **2.3.2 Processos de autorredução**

O Processo TECNORED® é um processo desenvolvido pela Tecnologos, numa parceria entre a PUC/RJ e a USP. As pelotas autorredutoras podem ser utilizadas em

substituição a carga ferrífera composta por minério aglomerado, sinter e pelotas representando uma diminuição de custos financeiros e de emissões de poluentes com a sinterização e pelletização.

Na Figura 9 o processo TECNORED® pode ser melhor entendido com a separação do forno em zonas e a divisão de cargas e produtos.

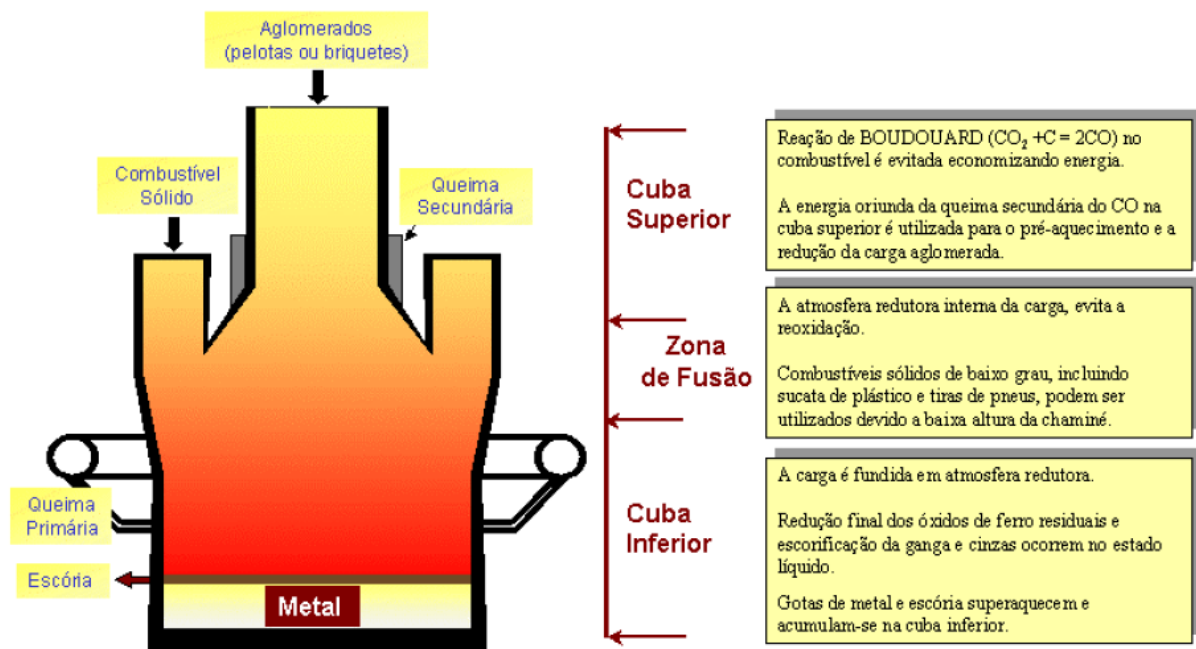


Fig. 9 – Forno TECNORED® para fusão redutora. Adaptado de [2]

Outra vantagem destacada no processo TECNORED® é o ganho de produtividade com a redução no tempo de residência da carga no reator, que pode ser visualizado na figura 10, além do baixo custo operacional, de instalação, ampliação e reforma [16].



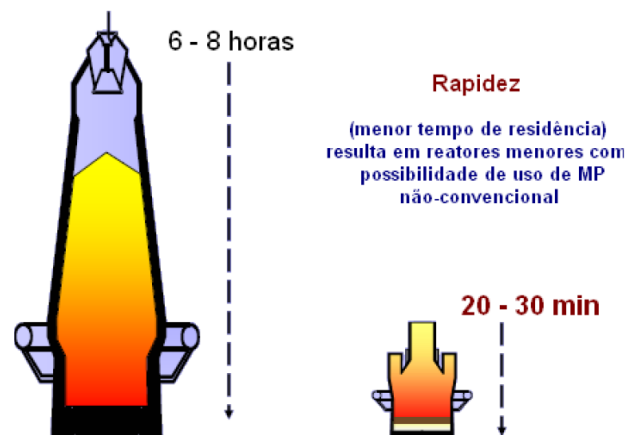


Fig. 10 – Tempo de processamento no Alto Forno e no processo TECNORED®. Extraído de [13].

Outro processo de destaque no uso de pelotas autorredutoras é o processo ITmk3 onde as pelotas autorredutoras são dispostas sequencialmente e são submetidas a aquecimento [13]. O carbono, já contido nas pelotas, reage para formar o CO e reduzir as pelotas, e a reação de pós combustão  $2\text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2$  por ser exotérmica gera mais calor para o processo. O gás de saída é o  $\text{CO}_2$  e o produto são núcleos de Fe e escória, ambos no estados sólido [21].

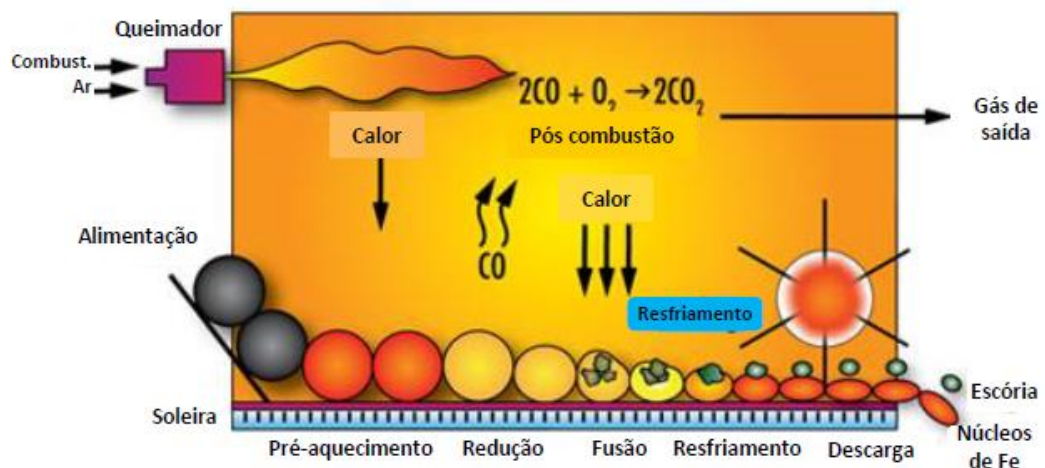


Fig. 11 – Processo Itmk3 para autorredução. Adaptado de [13].

### 2.3.3 Estado da Arte

Existem diversos pesquisadores espalhados pelo mundo estudando as propriedades mecânicas das pelotas autorredutoras e seus mecanismos de redução.

A redução não isotérmica de pelotas autorredutoras curadas a frio sob a ação de vapor de água pressurizado já foi objeto de estudo [14]. Para tal, os autores do estudo utilizaram misturas diversas compostas de finos de minério de ferro e carvão mineral não coqueificável ou carvão vegetal, ao qual foi adicionado aglomerante inorgânico em teores variados, com o objetivo de se otimizar a resistência a compressão das mesmas. As amostras foram aquecidas com taxas diferenciadas e de tendências opostas, e os gases de saída foram monitorados, e as medidas do avanço da redução bem como a resistência mecânica pós-reação também foram medidas.

Os resultados mostraram que algumas misturas propostas obtiveram ótimo desempenho em redução atingindo mais de 90% de redução, estando este resultado associado à maiores teores de carbono presentes e mais baixas taxas de aquecimento. Os piores desempenhos (46% de fração reduzida) estiveram associados àquelas amostras com baixo teor de carbono contido, sendo que neste caso não houve distinção no que tange à taxa de aquecimento.

Durante o aquecimento pode-se observar a secagem e a desvolatilização – no caso das amostras com carvão vegetal – das pelotas. Porém, os autores estimam que uma considerável quantidade de  $H_2O$  e  $CO_2$  ficou retida nas pelotas secas, e assim afetaram a geração de  $H_2$  e  $CO$  durante o aquecimento, fazendo com que apesar de não ser intencionado, o hidrogênio tenha contribuído para a redução. A resistência à compressão após a cura (em câmara úmida pressurizada) variou de 200 a 1000 N/pelota, já os valores após a redução foram muito inferiores, não chegando a ultrapassar os 100N

e também não tendo sido evidenciando uma correlação clara com o teor de carbono presente ou com a taxa de aquecimento.

Um amplo estudo de revisão da bibliografia dedicada a auto-redução [6], abordando os fundamentos das reações e fenômenos envolvidos, a cinética, processos industriais, comportamento mecânico e uso de aglomerantes também foi realizado. As observações evidenciaram que a redução em temperaturas elevadas – acima de 1200°C – é nitidamente mais rápida e mais sensível às condições de trocas térmicas, enquanto que em temperaturas mais baixas a gaseificação do carbono se torna mais relevante, assim como mais impactante as diversas características do redutor (quantidade, granulometria e tipo da fonte de carbono), como pode ser visto na figura 12 e na tabela 3, que detalha as condições relatadas em cada uma das referências mencionadas.

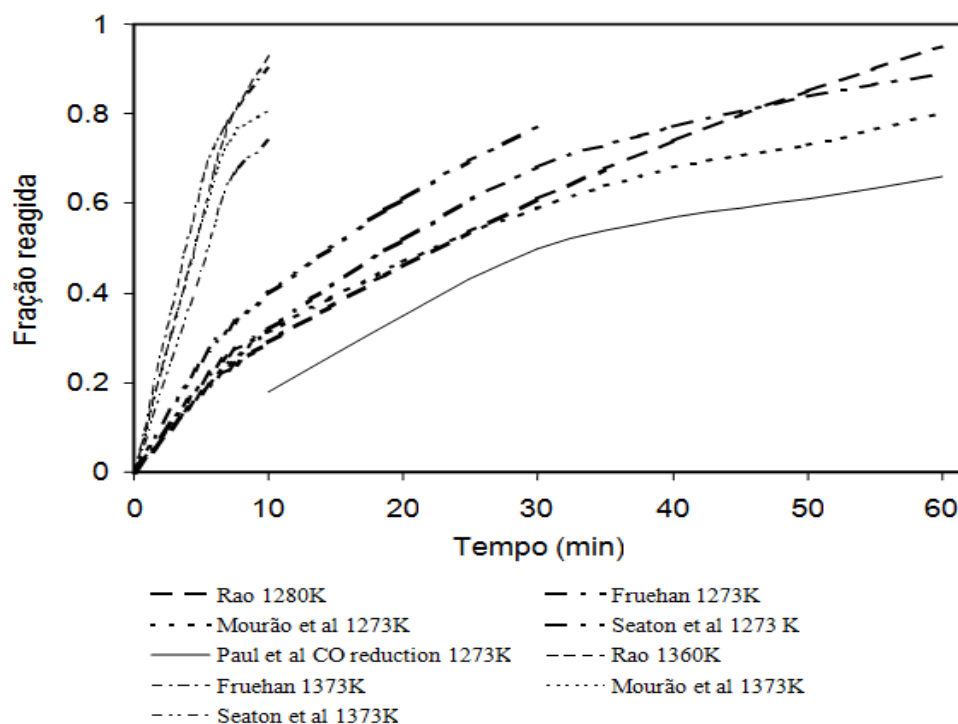


Fig. 12 – Curvas de fração reduzida x tempo por diferentes autores e condições - Adaptado de [24].

Tabela 3 – Relação dos autores das curvas mostradas na figura 12.

Autor	Fonte de Fe	Fonte de C	Amostra
Rao (1971)	Hematita em grau reagente – escala submicron	Carbono amorfo – abaixo de 50 microns	Pelotas de aproximad. 1g.
Fruehan (1977)	FeO sintético – abaixo de 74 microns	Carvão vegetal de de côco – abaixo de 74 microns	1g de mistura em cadinho.
Seaton et.al. (1983)	Concentrado de magnetita	Finos de carvão betuminoso.	Pelotas de 14 mm de diâmetro com CaO e sílica como aglomerante.
Mourão e Capocchi (1996)	Minério hematítico – abaixo de 44 microns	Carvão vegetal desvolatilizado – abaixo de 44 microns	Pelotas de 16 mm de diâmetro
Paul e Mukherjee (1992)	Hematita em pelota sem fluxo, queimada a 1473K, 55% de poros.	Não utilizada – CO como redutor	----

Além disso, foram discutidos as diversas opções de processos e como eles fazem uso dos aglomerados autorredutores, ficando evidente que os aglomerados a frio (apenas por efeitos químicos sem a adição de calor), atendem a maior parte destes processos, seja por estes usarem aglomerados de maior resistência a frio, seja por adotarem leitos de poucas camadas de pelotas, não necessitando assim que estas tenham grande resistência. Foi mencionada também a possibilidade de se adotar o aquecimento por microondas para promover a autorredução, ficando evidente que esta é uma opção viável visto que com o fato de o calor ser dissipado da pelota para o forno tem-se um gradiente térmico de dentro para fora da mesma, que não demanda uma atmosfera externa ao aglomerado com altos níveis térmicos, minimizando as perdas de calor.

A resistência mecânica em aglomerados autorredutores também foi abordada pelos pesquisadores visando elucidar os mecanismo a envolvem. A literatura relata o uso das chamadas pelotas de cura a frio, que usam tipicamente cimentos e/ou outros aglomerantes inorgânicos, sendo que opções orgânicas também podem ser adotadas, porém com perda de resistência durante o aquecimento em níveis térmicos mais altos. Foram relatadas também experiências que envolvem o uso do carvão como aglomerante em briquetes fabricados pela compressão a quente nas matérias-primas pré-aquecidas,

sendo que produto final é mais denso que as pelotas típicas, e possui resistência a compressão a frio da ordem de 1 kN.

Em estudo mais recente SANTOS, MOURÃO e TAKANO [24] focaram nas interações dos aglomerantes com o fenômeno da auto-redução. Pelotas de pequeno diâmetro (para minimizar as barreiras à troca de calor), contendo minério de ferro e fonte de carbono foram produzidas com e sem aglomerante (cimento Portland), e submetidas a testes de redução com acompanhamento da perda de massa nas temperaturas de 1150°C a 1350°C. Os resultados mostraram que a presença do cimento tem maior impacto em mais baixas temperaturas, como se pode notar na figura 13. Para as curvas referentes a 1150°C (1423K), observa-se inicialmente um melhor desempenho na presença de cimento, que é creditada à liberação da umidade do cimento que neste estágio reage com os gases liberados pelo carvão gerando redutores (CO e H<sub>2</sub>). Esse efeito também foi observado para os testes a 1250°C (1523K). A presença do cimento também interfere na estrutura interna do produto reduzido. Nas temperaturas mais baixas o cimento promove maior dispersão das partículas de ferro metálico. E em temperaturas mais elevadas as pelotas sem cimento sofreram fusão completa com aproximadamente 50% de redução, enquanto que nas pelotas com cimento, pontos de escória líquida se formaram contendo FeO, mas na medida que este óxido líquido foi gradativamente reduzido a temperatura liquidus desta escória se elevou, ocorrendo a ressolidificação da mesma, o que manteve a resistência da pelota em altas temperaturas.

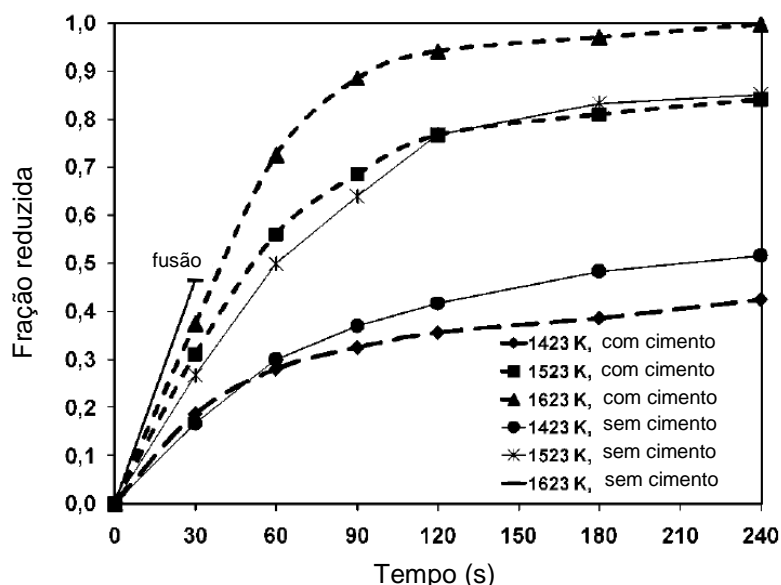


Fig. 13 – Fração reduzida x tempo para diferentes temperaturas em pelotas com e sem cimento - Adaptado de [24]

KASAI e colaboradores [15,16,17] desenvolveram pesquisas focadas na utilização de briquetes auto-redutores como parte da carga de um alto-forno. Tais briquetes eram constituídos de finos de minério e carvão mineral, que pela aglomeração a quente se torna densificado e resistente. Partindo da previsão de que o uso de aglomerados auto-redutores provocariam abaixamento na temperatura da zona de reserva térmica (considerando que a temperatura desta é aproximadamente consistente com a temperatura de início da reação de Boudouard), testes experimentais simulando leitos de carga de AF's contendo tais briquetes foram realizados. Os resultados mostraram que em virtude do grande contato entre o óxido de ferro e a fonte carbonácea promovido pelo briquete, a temperatura de início da gaseificação do carbono cai notavelmente, sendo este efeito observado mesmo quando o briquete é adicionado em pequenas quantidades à alimentação do leito. Outra observação feita pelos autores foi o uso mais eficiente do CO como redutor, uma vez reduzida a temperatura da zona de reserva térmica, atingindo altos graus de redução com uma menor quantidade de CO gerada.

UEDA e colaboradores [18] desenvolveram modelo para prever o comportamento e as interações com os demais componentes da carga quando um aglomerado auto-redutor é submetido às condições típicas de um alto-forno. Consideraram para tal que o aglomerado funciona a princípio como um microreator. Um modelo matemático associando as diversas reações envolvidas foi proposto e testes experimentais da oxidação do carbono foram feitos em equipamento termogravimétrico. Os resultados mostraram que aqueles parâmetros já anteriormente identificados na literatura como sendo influentes (diâmetro de partícula, reatividade do redutor) mantêm seu efeito. Outros parâmetros tais como a variação da composição da atmosfera ao redor da partícula também se mostraram importantes. Com relação a carga do forno como um todo, as avaliações apontaram que se na mistura a proporção C/O aumenta, a taxa de reação aumenta, e pode-se então projetar uma fração ótima em função do desempenho desejado para a redução.

YOKOYAMA e colaboradores [20] também investigaram os efeitos de se usar aglomerados autorredutores como parte da carga de um alto-forno. Para tal foram preparadas diferentes misturas contendo teores variados de carbono, e estas foram então testadas em um leito que combinou camadas de coque, sinter e pelota autorredutora, sob temperatura de 1100°C e aplicação de carga. As amostras, que continham 10% de cimento como aglomerante passaram também por testes de resistência a frio. Os resultados mostraram que o uso de pelotas aglomeradas com o auxílio do cimento podem ser ferramentas promissoras na busca pela redução do consumo de carbono em altos-fornos, visto sua rápida redução. Além disso, o uso de pelotas com altos teores de carbono não só potencializou sua própria redução como também a dos sínteres que estavam em sua vizinhança. Levando em conta estes efeitos positivos associados às avaliações de resistência mecânica (antes e depois da redução), os autores concluíram

que uma participação do carbono da ordem de 20% na mistura com o óxido de ferro é desejável.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

No presente trabalho onde o objetivo foi determinar como a hidratação complementar - realizada após a produção das pelotas que já demandam água em sua produção - afetaria as propriedades mecânicas das pelotas autorredutoras. Para que o resultado encontrado representasse apenas o efeito da hidratação, foram produzidas pelotas de mesma composição química e tamanho, que foram submetidas a dois diferentes processos de hidratação complementar: hidratação por imersão e em câmara úmida.

A verificação da influência da hidratação complementar nas propriedades mecânicas de pelotas autorredutoras ocorreu através de ensaios mecânicos de compressão e através do ensaio de tamboramento, que serão explicitados a seguir.

#### 3.1 Composição das pelotas autorredutoras

Como citado em 2.1.4, as matérias-primas usadas na preparação de pelotas autorredutoras são: minério de ferro, fonte carbonácea, ligante e fundente. No presente trabalho foi utilizado o pellet-feed como fonte ferrífera, carvão mineral não-coqueificado, cimento Portland ARI (alta resistência inicial) como aglomerante e cal como fundente.

##### **Pellet-feed:**

O pellet-feed utilizado tem como origem uma grande mineradora brasileira e sua composição química e granulométrica podem ser verificadas nas tabela 4 e 5,



respectivamente. A sua distribuição granulométrica foi realizada com auxílio de um peneirador automático do tipo ROTAP.

Tabela 4 – Composição química do pellet-feed utilizado.

Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	P	LOI
93,80%	1,28%	1,53%	0,42%	0,12%	0,05%	0,072%	2,73%

Tabela 5 – Distribuição granulométrica do pellet-feed utilizado

+150µm	+106µm	+75µm	+53µm	+53µm
(#100)	(#140)	(#200)	(#270)	(Fundo)
1,82%	4,83%	9,45%	19,13%	64,78%

#### **Carvão Mineral:**

O carvão utilizado é mineral e comercialmente puro, tendo sido obtido diretamente do descarregamento do navio no porto. O carvão passou por moagem em moinho de barras e foi peneirado com auxílio de equipamento ROTAP, e separado nas faixas de 75µm, 53µm e fundo.

#### **Cimento Portland ARI:**

O cimento utilizado foi do tipo alta resistência inicial (ARI) sendo obtido de lote comercial. Sua composição química típica é apresentada na Tabela 6.

Tabela 6 – Composição química do cimento Portland ARI.

CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	Na <sub>2</sub> O	CaO	Outros
64,3%	19,1%	4,9%	2,8%	2,6%	0,7%	0,6%	0,1%	1,0%	4,0%

### **Cal Hidratada:**

A cal hidratada, usada para ajudar na aglomeração, regular a basicidade e diminuir o ponto de fusão da escória, além de atuar como fluxante das impurezas do minério, tem composição química conforme Tabela 7.

Tabela 7 – Composição química típica da cal hidratada.

CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	Umidade
62,8%	3,8%	27,3%	6,1%

### **Preparação das pelotas autorredutoras**

Para chegar as proporções de cada matéria-prima que seriam usadas na mistura, estimativas de massa por pelota, densidade e raio das mesmas foram feitas. As pelotas foram confeccionadas através da mistura das matérias-primas com proporção representada na Tabela 10. A mistura foi homogeneizada com auxílio de máquina misturadora. No total foram preparadas 280 pelotas.

Tabela 8 – Configuração geométrica das pelotas.

Raio da Pelota (cm)	Volume da pelota (cm <sup>3</sup> )	Massa (g/unid)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )
0,6	0,91	2,96	3,27

Tabela 9 – Massa dos constituintes utilizados na mistura autorredutora.

Pellet Feed (g)	Carvão (g)	Cal (g)	Cimento (g)
663,50	165,88	29,03	82,94

Tabela 10 – Percentagem de constituintes em cada pelota.

Pellet Feed	Carvão	Cal	Cimento
70,5%	17,6%	3,1%	8,8%

As pelotas foram confeccionadas manualmente, por etapas que podem ser observadas na sequência de Figura 14. A fig. 14.a mostra a mistura homogênea. Primeiramente, foi feita a separação das partículas que se aglomeraram na mistura homogeneizada e a quebra de torrões (fig. 14.b). A mistura era então separada em formas de pilha, para facilitar a homogeneização da mistura e sua hidratação (fig. 14.c). Feito isso, a adição de água foi realizada com intuito de aglomerar as partículas e conferir resistência mecânica a pelota (fig. 14.d). Cuidados para que as pelotas não ficassem úmida demais e então achatassem quando postas para cura foram tomados, o que também facilitava sua modelagem (fig. 14.e). A mistura úmida formada era então moldada para forma esférica pelo movimento rotativo das mãos (fig. 14.f).

O controle do diâmetro e do peso foram feitos por amostragem, onde as pelotas passavam por anel de 1 polegada e eram então pesadas em balança de precisão.



Fig. 14 – Sequência de etapas para confecção das pelotas autorredutoras.

### 3.2 Cura a frio

Após a preparação das pelotas autorredutoras elas foram divididas em três diferentes grupos que foram submetidos a processos de cura diferenciados: cura sem

hidratação complementar, cura seguida de hidratação complementar por imersão em água e cura seguida de hidratação complementar em câmara úmida.

No primeiro grupo as pelotas foram deixadas ao ar para que sua cura ocorresse de maneira natural, sem adição de água, ou seja, a água necessária para as reações químicas destacadas na aglomeração a frio pelo cimento era proveniente apenas do processo de pelotização manual. As pelotas foram submetidas ao ensaio de tamboramento e de compressão à frio após 28 dias curando ao ar.

O segundo grupo de pelotas foi submetido a hidratações complementares por imersão em água, de maneira a acrescentar maiores teores de água as mesmas e assim promover uma aglomeração mais eficiente dado as reações de hidratação do cimento [6]. As pelotas foram confeccionadas e após 72 horas do início da cura, foram subdivididas em quatro sub-grupos, que diferenciaram entre si pelo tempo de imersão aplicado. No primeiro grupo foi realizada uma imersão de 20 minutos e após 7 dias de cura as pelotas foram submetidas ao ensaio de tamboramento e de compressão à frio. No segundo grupo duas imersões foram realizadas: a primeira imersão de 10 minutos e, após 72 horas de cura ao ar, nova imersão de 10 minutos. Após 7 dias de cura ao ar, as pelotas foram submetidas aos mesmos ensaios que o grupo 1. No terceiro grupo uma imersão de 10 minutos foi realizada após os 3 dias de cura. O quarto grupo foi submetido a imersão de 30 minutos após os 3 dias de sua confecção.

O terceiro grupo de pelotas foi submetido a cura em câmara úmida após 72 horas transcorridas de sua confecção. As pelotas foram sub-divididas em 3 grupos e colocadas na câmara úmida e após 24 horas, 48 horas e 120 horas elas foram retiradas, submetidas a cura por 7 dias ao ar e submetidas ao ensaio de tamboramento e de compressão a frio. O quarto e último grupo foi deixado por 7 dias seguidos na câmara úmida e então ensaiados após outros 7 dias de cura ao ar.

Tabela 11 – Tipos de pelotas produzidas.

	Cura ao Ar	Imersão em água				Câmara Úmida			
	Tipo I	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo IV	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo IV
Hidratação complementar	-	10 minutos	10 + 10 minutos	20 minutos	30 minutos	1 dia	2 dias	5 dias	7 dias
Tempo de cura	28 dias	3 + 7 dias	3 + 3 + 7 dias	3 + 7 dias	3 + 7 dias	3 + 7 dias	3 + 7 dias	3 + 7 dias	3 + 7 dias
Tempo Total	28 dias	10 dias	16 dias	10 dias	10 dias	11 dias	12 dias	15 dias	17 dias



Fig. 15 –Pelotas imersas em água.



Fig. 16 – Câmara úmida utilizada para hidratação das pelotas.

### **3.3 Ensaios Mecânicos**

Dois ensaios foram utilizados para a caracterização das pelotas autorredutoras: ensaio de tamboramento e compressão a frio.

#### **3.3.1 Ensaio de Tamboramento**

Para a medição da resistência a abrasão das pelotas foi utilizado um moinho de tamboramento, que funciona como ilustrado na Figura 17. No ensaio de tamboramento, as pelotas são elevadas até a uma determinada altura pelas pás que ficam dentro do tambor e então caem sobre o tambor, de modo contínuo e repetitivo. Esse experimento pode ser entendido como um ensaio de resistência à degradação por quebra volumétrica [22]. A quebra volumétrica é a mais importante nesse tipo de ensaio, embora também ocorra a quebra superficial.

No ensaio de tamboramento realizado no presente trabalho foram utilizadas 15 pelotas autorredutoras, com pesagem realizada antes e após o ensaio. Os parâmetros do

ensaio foram iguais para todas as pelotas, onde a velocidade do moinho foi de 12,7 rpm e o tempo de ensaio 2 minutos. O diâmetro do moinho é de 1 metro.

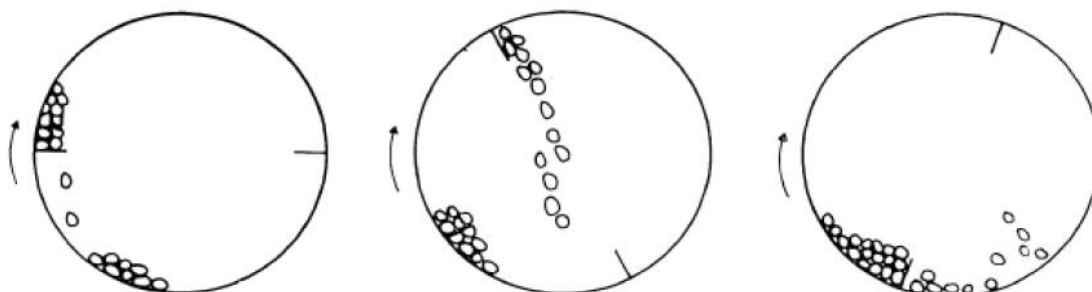


Fig. 17 - Representação do movimento das pelotas num ensaio de tamboramento. Retirada de [22].

### 3.3.2 Ensaio de Resistência à compressão a frio

O ensaio de compressão a frio é um ensaio de rotina realizado nas unidades pelletizadoras e que permite prever, com certa limitação, a força média de esmagamento suportada pelas pelotas durante o seu manuseio e o carregamento nos fornos. O ensaio consiste em aplicar uma força por uma prensa com uma base plana, onde é colocada a pelota, até o seu esmagamento. Um computador registra o deslocamento e a força realizada pela máquina.

A prensa utilizada para realização do ensaio era da marca EMIC modelo DL 1000, equipada com célula de carga de 10kN e usando taxa de avanço do cabeçote de 5mm/min. Com auxílio de bases planas para apoio das pelotas foi realizado o ensaio em temperatura ambiente. O teste transcorreu até que as pelotas fraturassem e a informação gerada no ensaio consistiu em um gráfico em força versus deslocamento do cabeçote. Foram ensaiadas 10 pelotas de cada grupo.





Fig. 18 - Prensa EMIC utilizada no ensaio de compressão a frio.

### 3.3.3 Ensaio de microdureza

Foram realizados testes de microdureza ao longo do raio das pelotas com intuito de verificar a extensão de hidratação pelo interior da mesma. Os testes foram de difícil execução, assim como a interpretação dos dados, haja vista a porosidade do material, o que prejudicou definição das diagonais necessárias ao cálculo do resultado. A carga aplicada as pelotas foi de 100 gf. As pelotas foram lixadas até seu centro em ausência de água e embutidas a frio, como pode ser visto nas Figuras 20, 21 e 22. O identador utilizado foi uma pirâmide de diamante com ângulo de  $136^\circ$  e o tempo de penetração foi de 15 segundos.

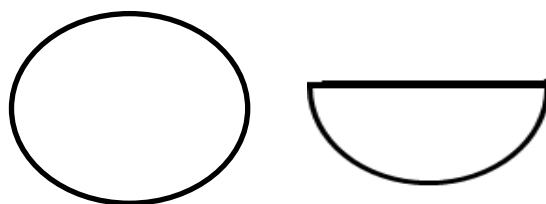


Fig. 19 - Representação esquemática das pelotas inteiras e lixadas pela metade.

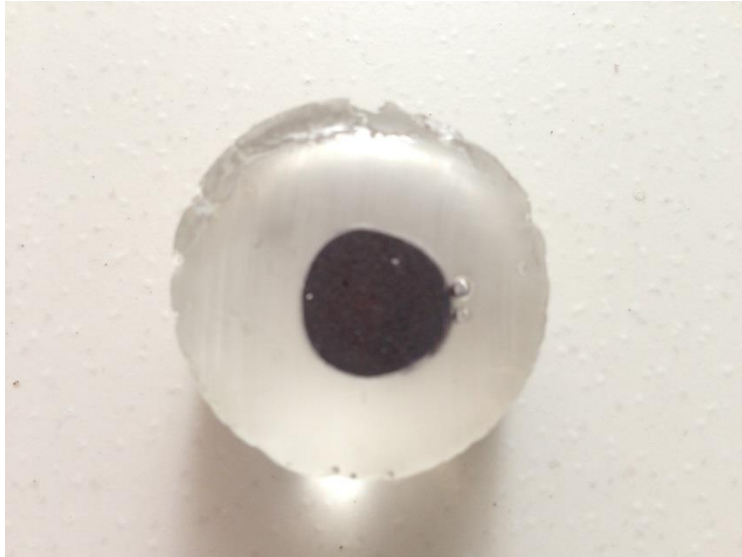


Fig. 20. – Pelota embutida a frio.

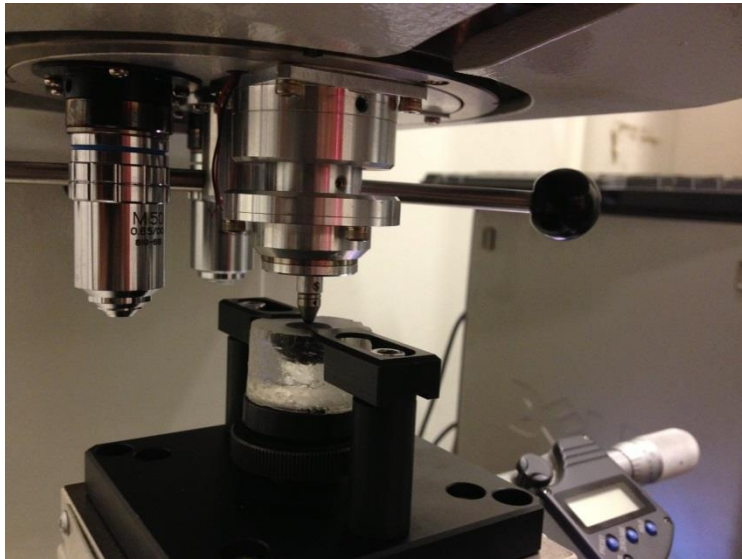


Fig. 21 – Medição de microdureza.



Fig. 22 – Medição do diâmetro da pelota.

#### 4. RESULTADOS E ANÁLISES

Os resultados dos testes realizados nas pelotas foram separados pelos ensaios mecânicos. A comparação entre os métodos de hidratação é dada primeiramente pelo mesmo meio, ou seja, pela busca da otimização no tempo de hidratação, seja ele em câmara úmida ou por imersão. Finalmente comparou-se os resultados obtidos pelos dois métodos e pode ser definido o mais eficiente.

##### **4.1 Compressão a frio**

##### **Imersão em água**

As pelotas que não sofreram hidratação complementar funcionaram como base para caracterizarmos e compararmos os efeitos da hidratação complementar nas propriedades das pelotas. Foram ensaiadas 10 pelotas de cada um dos quatro tipos de pelotas hidratadas por imersão e mais 10 pelotas não hidratadas, totalizando 50 pelotas ensaiadas. A hidratação pode ser observada na Figura 15, onde todas as pelotas estão completamente imersas em água a temperatura ambiente e o tempo de permanência foi cronometrado. As Figuras 23, 24, 25, 26 e 27 apresentam os resultados obtidos para cada tipo de pelota.

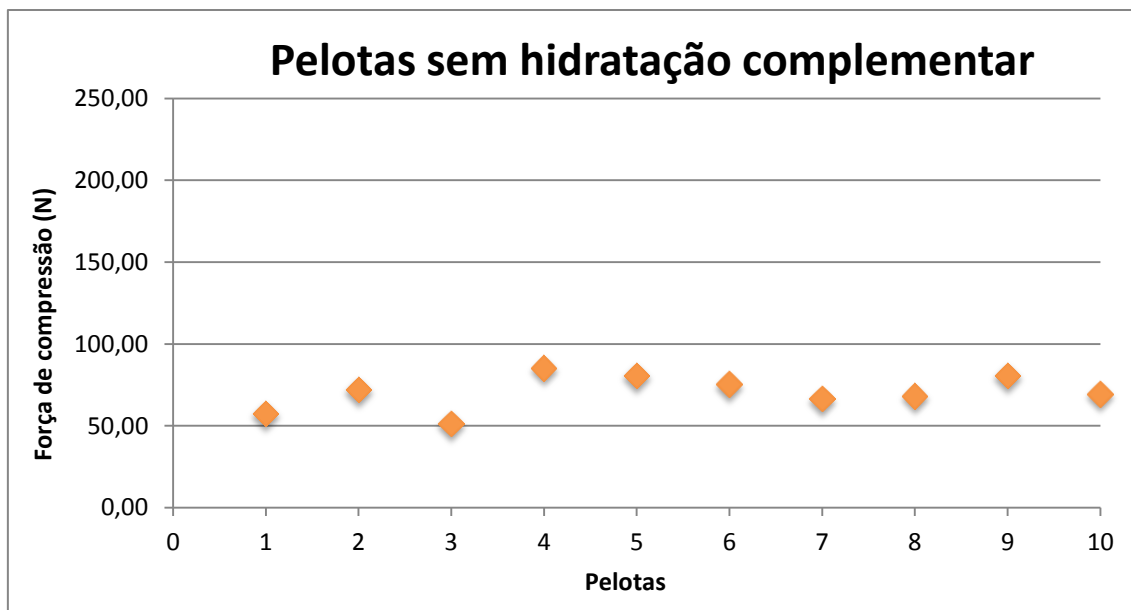


Fig. 23 – Pelotas curadas por 28 dias sem hidratação complementar.

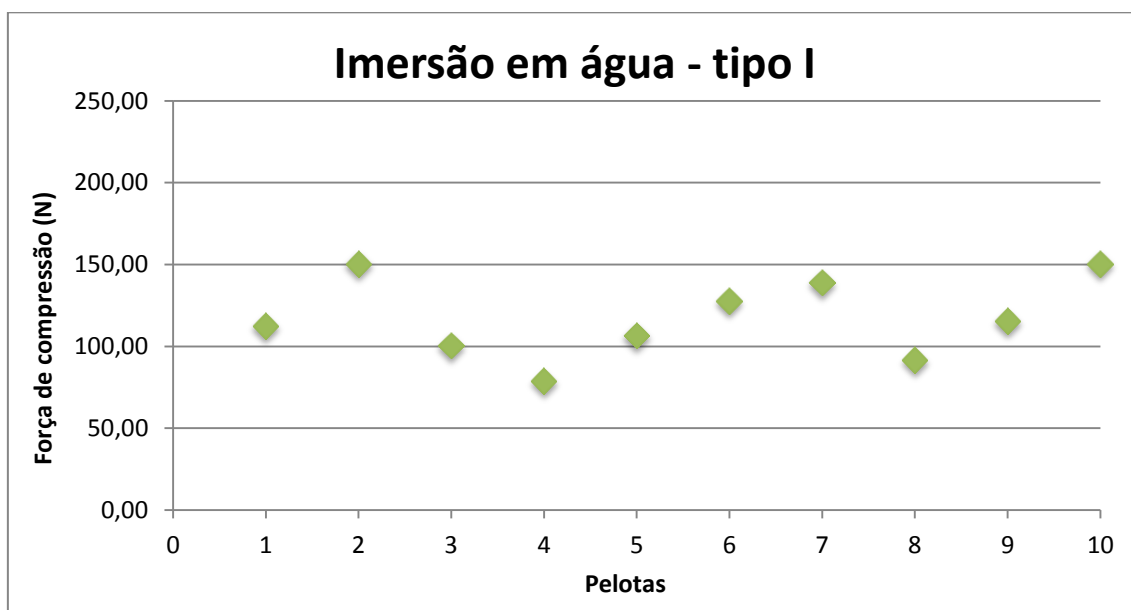


Fig. 24 – Pelotas imersas em água por 10 minutos

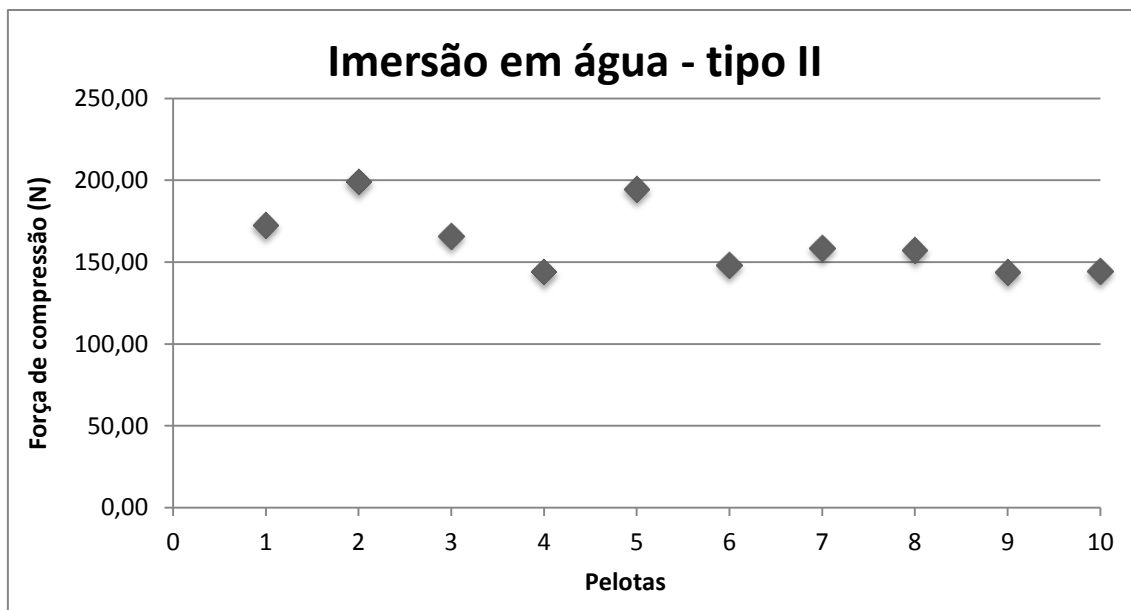


Fig. 25 – Pelotas imersas por 10 minutos, curadas por 3 dias e novamente imersas por 10 minutos.

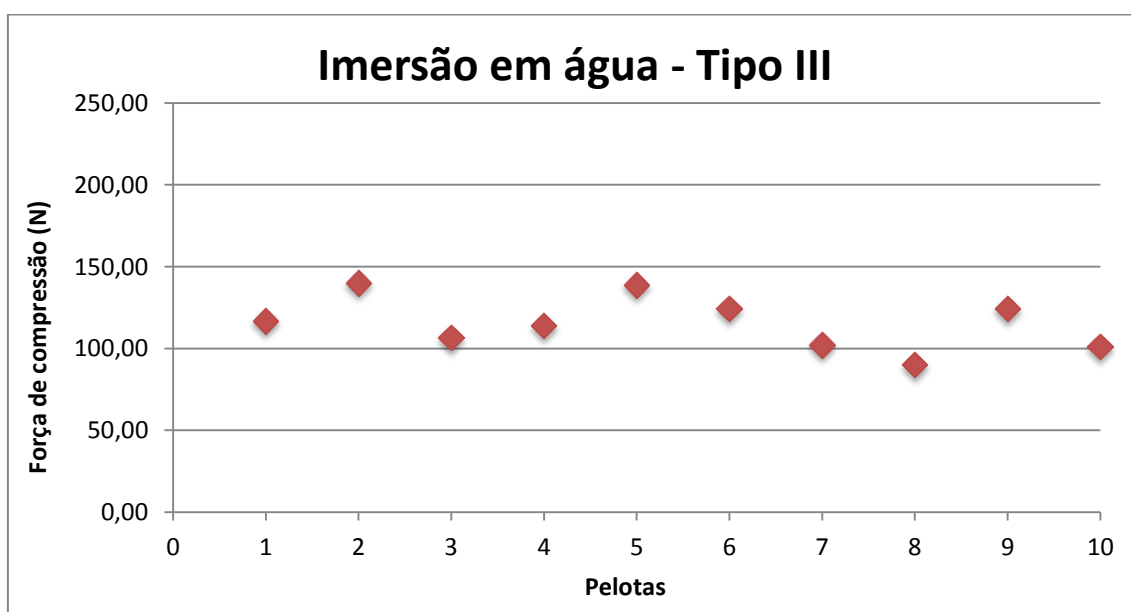


Fig. 26 – Pelotas imersas em água por 20 minutos.

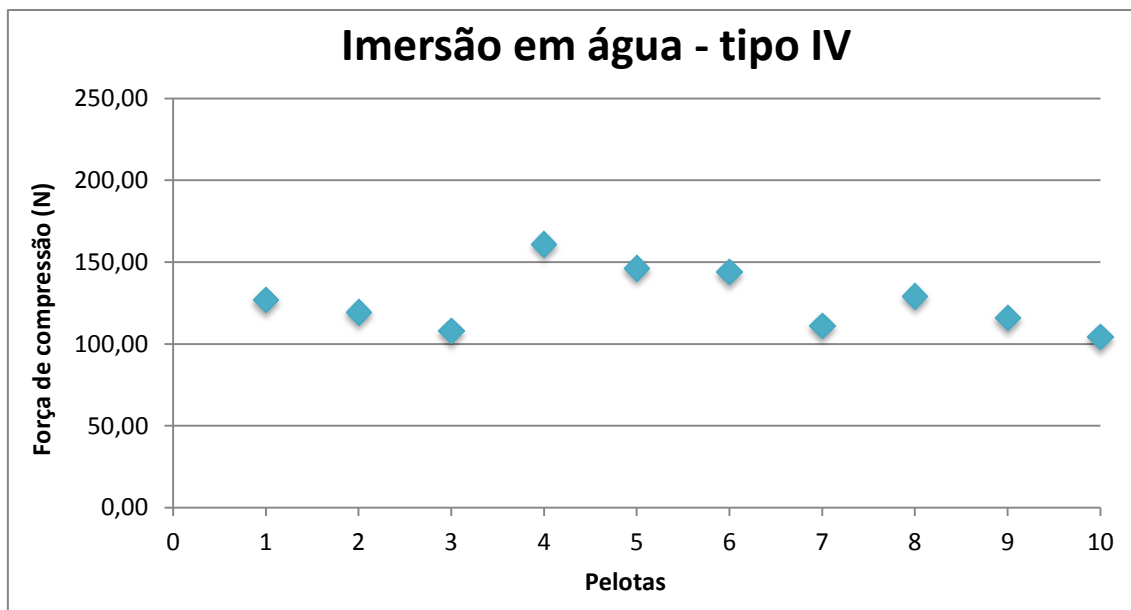


Fig. 27 – Pelotas imersas em água por 30 minutos.

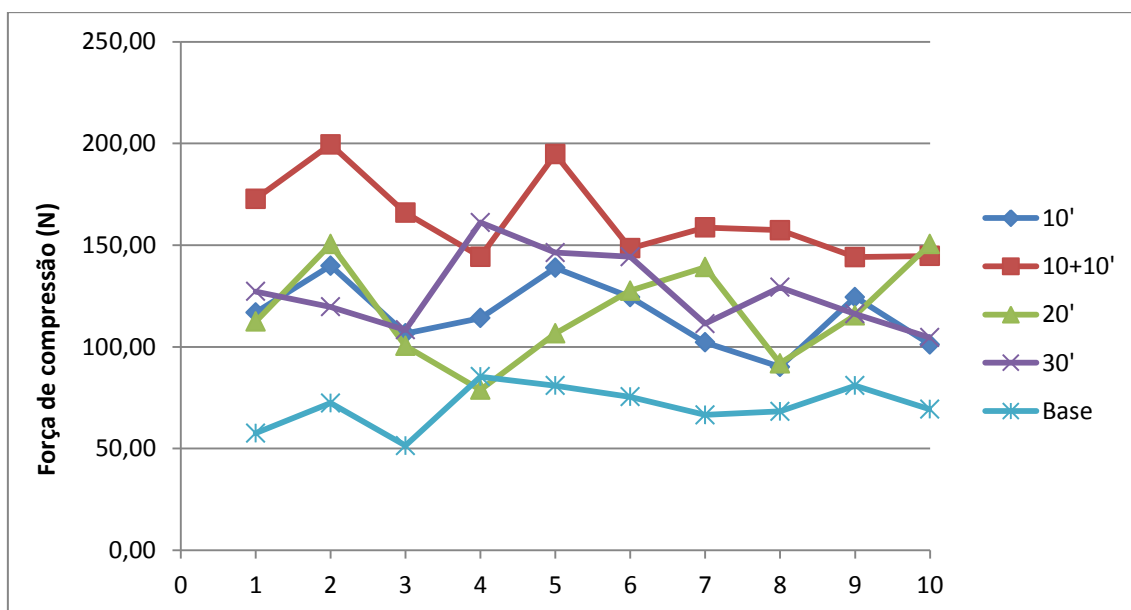


Fig. 28 – Comparação dos resultados entre os tipos de pelotas - Imersão

Como pode ser observado na figura 28, as pelotas do Tipo II apresentaram a maior resistência a compressão comparada as outras pelotas, embora tenham sofrido o mesmo tempo de imersão, de 20 minutos, que as pelotas do tipo III. A diferença do preparo desses dois tipos foi a pausa entre as imersões de 3 dias que sofreram as pelotas

do tipo II, seguido por nova imersão. Essa sequência de duas hidratações, ao invés de apenas uma, fez com que as pelotas atingissem as maiores resistências a compressão, o que pode ser explicado devido ao intervalo de tempo que permite as reações químicas de hidratação ocorram.

Por fim, observa-se que para os tempos de 10, 20 e 30 minutos de imersão os resultados foram muito próximos, indicando que existe um tempo de saturação para as pelotas avaliadas, e que neste caso deve ser menor que 10 minutos, e deve ser afetado pela porosidade total da pelota, comprimento médio dos poros e geometria do aglomerado.

Pode-se observar também, na figura 29, que a resistência média das pelotas aumentou consideravelmente em todos os tipos de imersão. O maior aumento de resistência foi observado para pelotas do tipo II, onde sua resistência média mais que duplicou de valor, saltando de 70,8N para 163,0N.

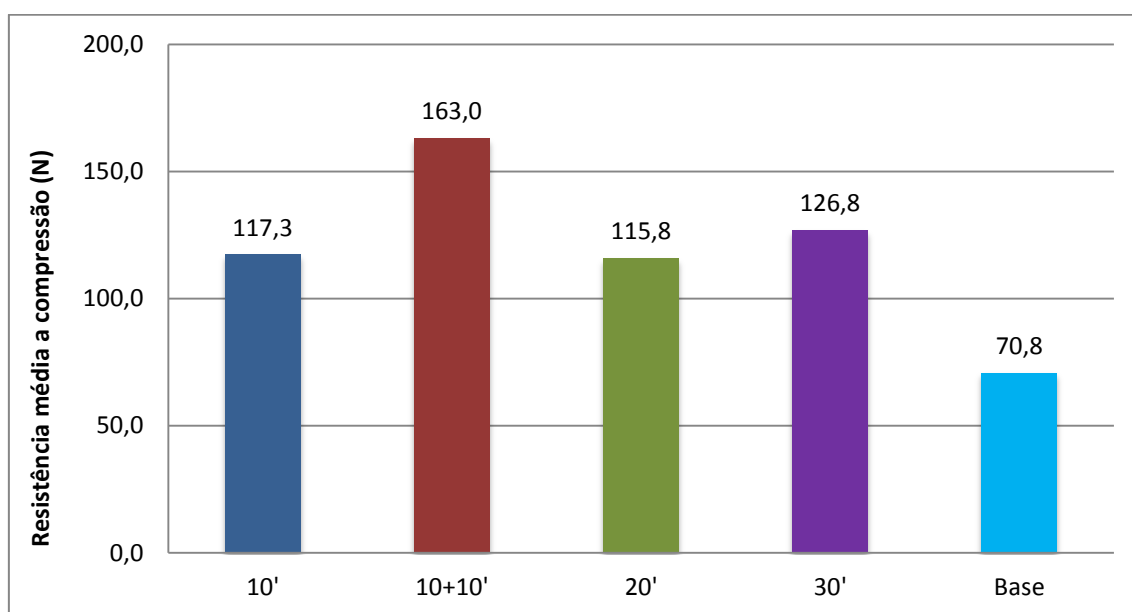


Fig. 29 – Média de resistência por tipo de pelota – Imersão em água

Tabela 12 – Comparação dos valores para pelotas hidratadas por imersão em água.

	10'	10+10'	20'	30'	Base
<b>Média (N)</b>	117,3	163,0	115,8	126,8	70,8
<b>Máximo (N)</b>	150,5	199,5	139,8	161,1	85,3
<b>Mínimo (N)</b>	78,8	144,1	90,1	104,5	51,4
<b>Desvio Padrão (N)</b>	23,1	19,4	15,5	17,6	10,1

O valor máximo de resistência a compressão encontrado para uma pelota foi de 199,5N para uma pelota do tipo II, e o menor valor foi de 51,4N para uma pelota não hidratada, o que já era de se esperar. A comparação entre pelotas produzidas em escala industrial e em escala laboratorial, com o mesmo material, mostrou que pelotas industriais possuem resistência aproximadamente 5 vezes maior [6]. Apesar da necessidade de estudos mais aprofundados no assunto, tal fato vêm sendo creditado a maior compacidade das pelotas industriais. O aumento da resistência das pelotas pode ser creditado a reação de hidratação dos tri-cálcios silicatos ( $C_3S$ ), dado ao pouco tempo de cura que as pelotas enfrentaram [6]. A máxima resistência poderia ser alcançada dentro de 3 a 4 semanas de cura, pela hidratação de  $C_2S$  [6].

### **Câmara úmida**

A Câmara úmida utilizada no ensaio apresentava umidade de  $\pm 99\%$  e temperatura de  $25^\circ\text{C}$ . As pelotas foram dispostas em bandejas que não entravam em contato direto com a água. As Figuras 30, 31, 32 e 33 apresentam os resultados encontrados para cada um dos 3 lotes de amostras.



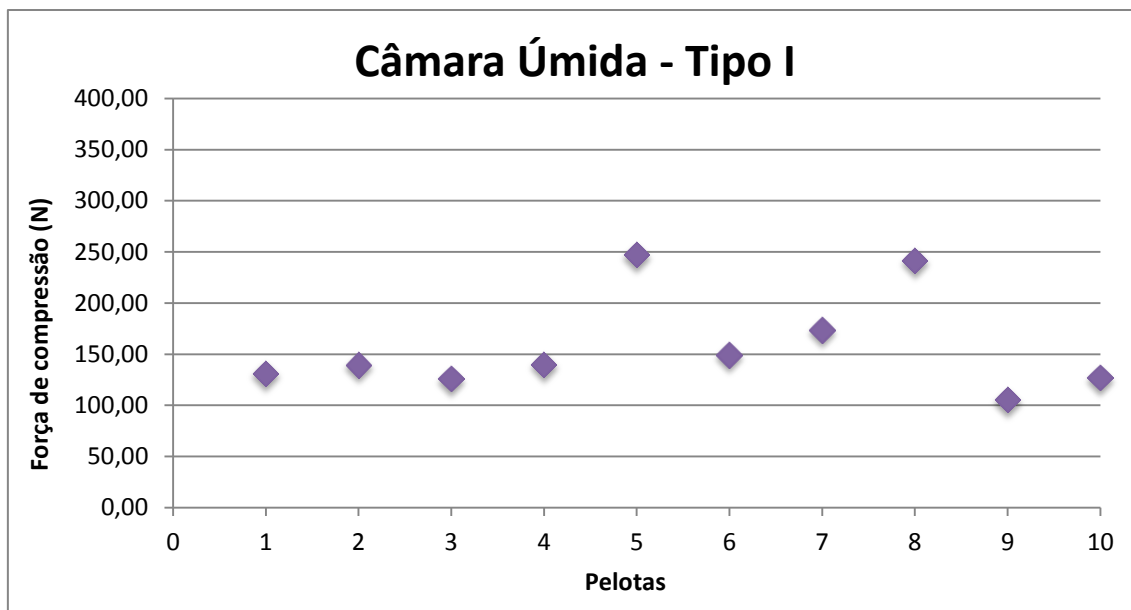


Fig. 30 – Pelotas hidratadas em câmara úmida por 1 dia.

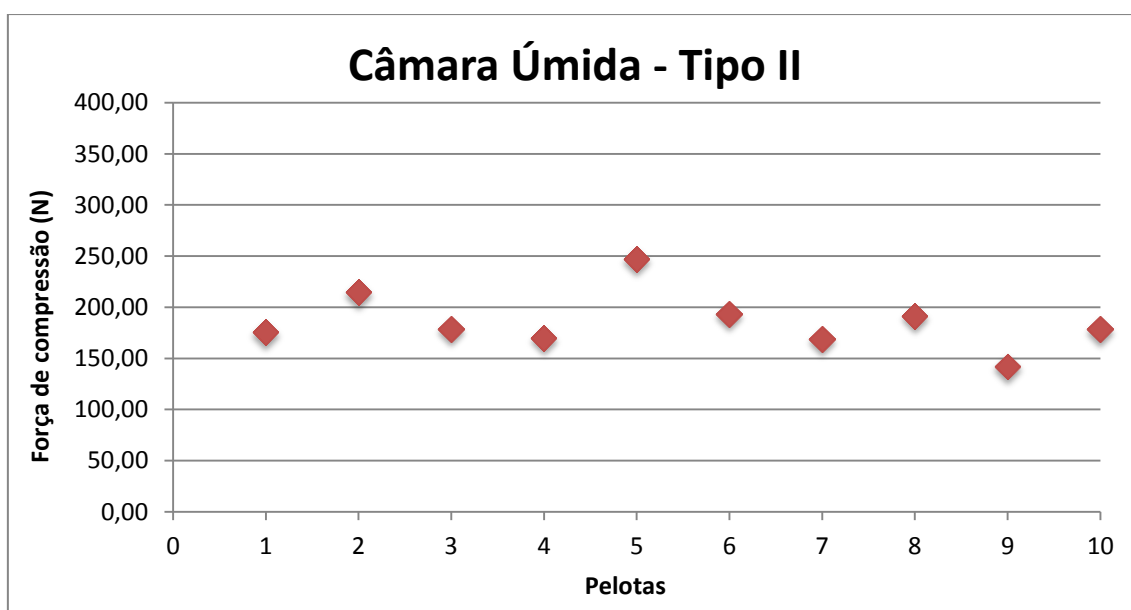


Fig. 31 – Pelotas hidratadas em câmara úmida por 2 dias.

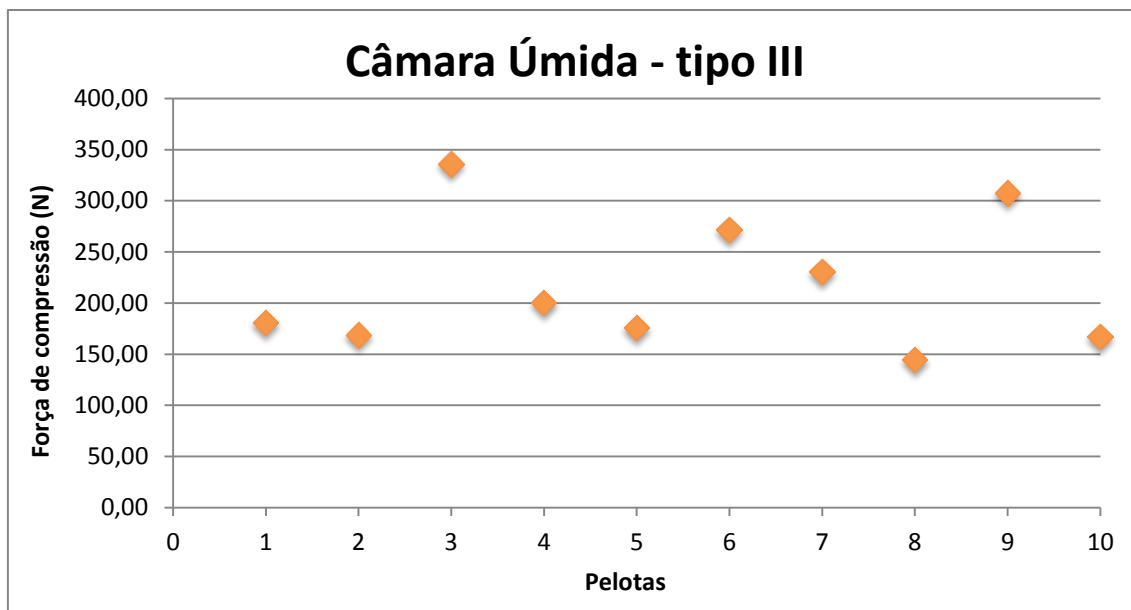


Fig. 32 – Pelotas hidratadas em câmara úmida por 5 dias

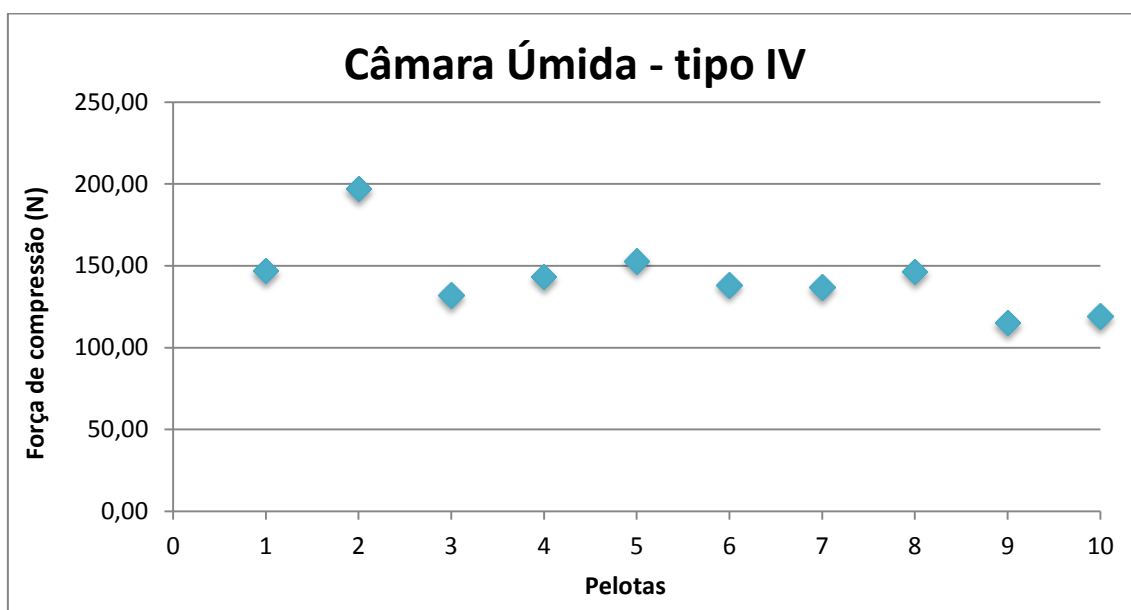


Fig. 33 – Pelotas hidratadas em câmara úmida por 7 dias

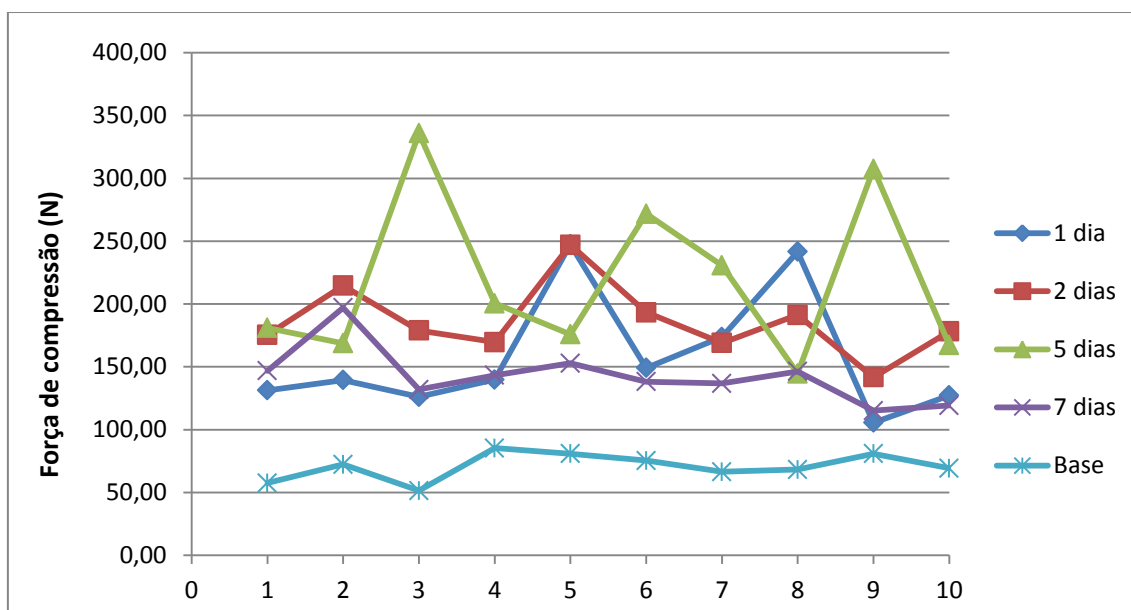


Fig. 34 – Comparação dos resultados entre os tipos de pelotas – Câmara úmida

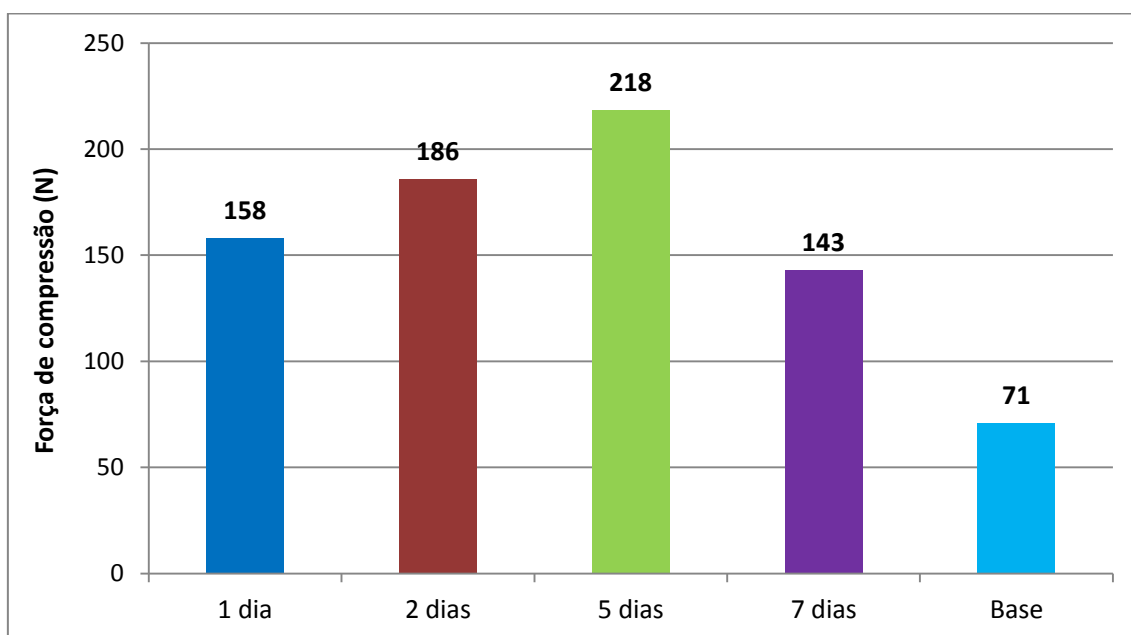


Fig. 35 – Média de resistência por tipo de pelota – Câmara úmida

Tabela 13 - Comparação dos valores para pelotas hidratadas por câmara úmida.

	Câmara Úmida				
	1 dia	2 dias	5 dias	7 dias	Base
<b>Média (N)</b>	158,1	185,9	218,4	142,7	70,8
<b>Máximo (N)</b>	247,5	247,1	335,9	197,0	85,3
<b>Mínimo (N)</b>	105,6	141,8	144,6	115,16	51,4
<b>Desvio Padrão (N)</b>	46,3	27,1	62,3	21,37	10,1

A resistência média das pelotas aumentou gradativamente com o tempo de residência na câmara úmida, como pode ser observado na Figura 35.

O maior valor encontrado entre todas as pelotas foi a do tipo III que permaneceu durante 5 dias na câmara, e a resistência média das pelotas deste tipo triplicou de valor quando comparadas àquelas de referência. Houve grande oscilação das medidas feitas das pelotas do tipo I e III, fato sem evidência direta da influência do tipo de hidratação, e sim associado ao possível preparo das pelotas desses tipos. Outra observação que pode ser feita sobre as pelotas que foram hidratadas em câmara úmida é que após atingido determinado valor em 5 dias, sua resistência média caiu significativamente, o que pode ser entendido como uma degradação pelo excesso de umidade dado o longo tempo de exposição na câmara. O ponto ótimo de hidratação em câmara úmida se encontra próximo a 5 dias.

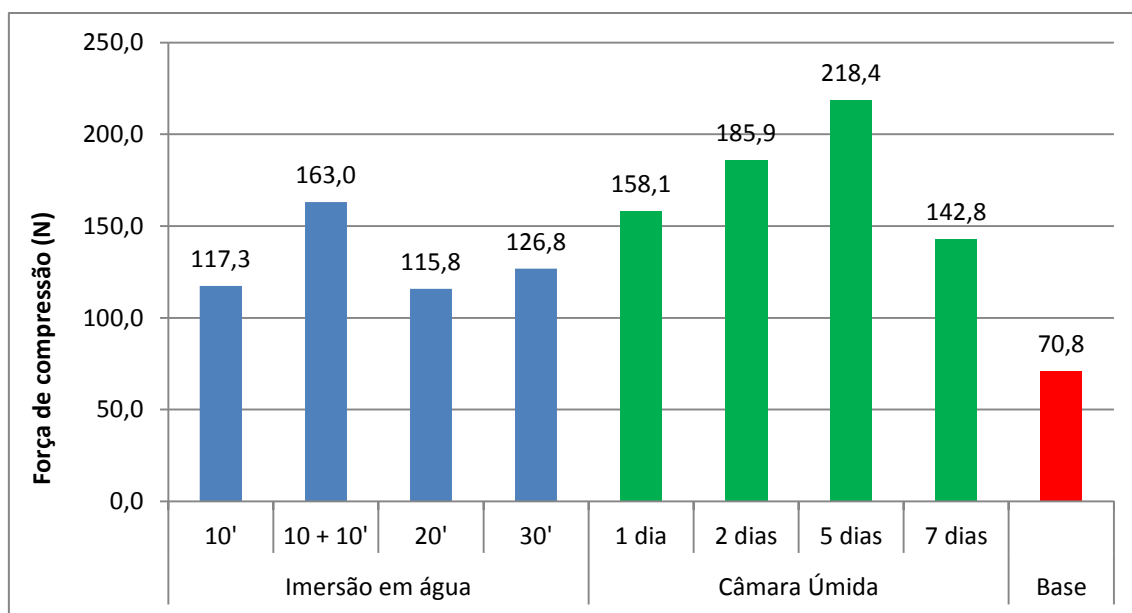


Fig. 36 – Comparação entre todos os tipos de pelotas produzidas.

Quando são comparados todos os lotes de amostras, observamos uma clara vantagem das pelotas hidratadas em câmara úmida. Tal fato pode ser explicado pela maior quantidade disponível de água para hidratação do cimento, que confere o aumento da resistência. Entretanto, o excesso de umidade produz uma diminuição na resistência da pelota, como mostrado para pelotas hidratadas por 7 dias em câmara úmida.

A imersão em água por 10 minutos seguido por cura de 3 dias e mais 10 minutos de imersão, pelotas tipo II, que obtiveram melhor desempenho em hidratação por imersão, produziu resultado próximo a imersão em câmara úmida por 24 horas.

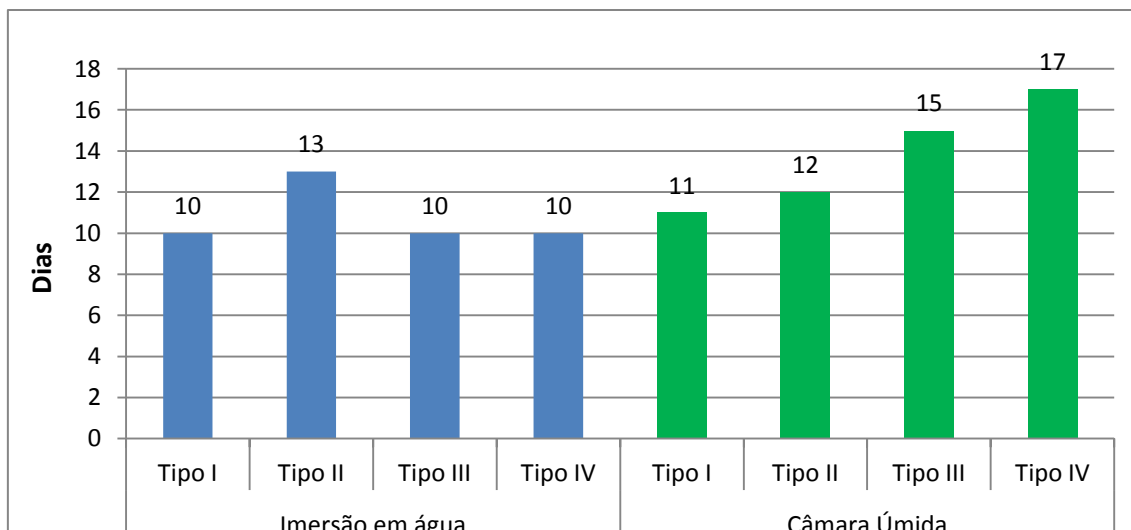


Fig. 37 – Tempo transcorrido desde a confecção aos ensaios.

Considerando o tempo total de produção até o ensaio das pelotas, pode-se afirmar que nenhum grupo que sofreu hidratação atingiu o tempo de resistência máxima, que é de 4 semanas [8].

#### 4.2 Testes de microdureza

Os dois tipos de pelotas escolhidos para realização da microdureza foram aquelas que apresentaram os maiores resultados de compressão a frio, ou seja, do tipo II (10+10') por imersão e do tipo III (5 dias) em câmara úmida. As medições foram feitas no sentido vertical e horizontal a partir do centro para borda das pelotas, e então feito a média dos resultados. A figura 36 apresenta os gráficos obtidos para cada tipo de pelota.

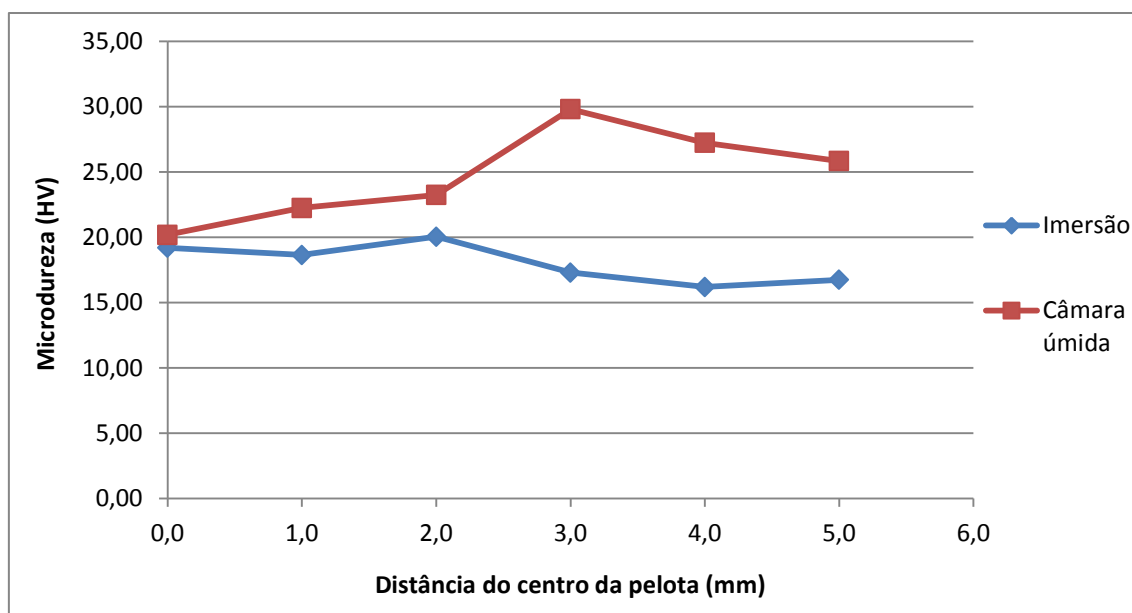


Fig. 38 – Microdureza ao longo do raio das pelotas.

Analisando a figura 38, observa-se uma constância dos resultados de microdureza para as pelotas que sofreram imersão, o que induz a conclusão de saturação de água no interior da pelota. Diferentemente das pelotas que sofreram imersão, as que ficaram em câmara úmida por 5 dias apresentaram características de aumento da dureza em relação ao raio, ou seja, menores durezas foram encontradas no centro, onde menos água conseguiu penetrar no material, causando menos hidratação e então ficando menos resistentes. Pode-se, novamente, confirmar que as pelotas expostas por 5 dias em câmara úmida ainda não atingiram o ponto máximo de hidratação.

#### 4.3 Testes de tamboramento

A norma ISO 3271 (Determination of tumble strength) é seguida para realização de ensaios de tamboramento em pelotas, entretanto os ensaios não seguiram essa norma, dado a pequena quantidade de pelotas autorredutoras confeccionadas, frente a grande quantidade de pelotas que o ensaio normatizado necessita.

O tamboramento foi realizado com 15 pelotas de cada tipo, durante 2 minutos em velocidade de 12,7 RPM.



Fig. 39 – Pelotas antes do ensaio de tamboramento



Fig. 40 Pelotas após tamboramento – Base





Fig. 41 Pelotas após tamboramento – Imersão 10 minutos (tipo I)



Fig. 42 – Pelotas após tamboramento – Imersão 10 + 10' minutos (tipo II)



Fig. 43 – Pelotas após tamboramento - Imersão 20 minutos (tipo III)



Fig. 44 – Pelotas após tamboramento – Imersão por 30 minutos (tipo IV).



Fig. 45 – Pelotas após tamboramento – Câmara úmida 1 dia (tipo I).



Fig. 46 – Pelotas após tamboramento – Câmara úmida 2 dias (tipo II).



Fig. 47 – Pelotas após tamboramento – Câmara úmida 5 dias (tipo III).



Fig. 48 - Pelotas após tamboramento – Câmara úmida 7 dias (tipo IV).

Pode-se observar que em todos os casos as pelotas não resistiram ao ensaio de tamboramento, embora nas pelotas câmara úmida tipo III, 3 pelotas resistiram inteiras.

Nas pelotas imersas em água, a tipo II (10+10') mostrou qualitativamente maior fração de partículas mais grossas, porém pelotas carregadas no tambor foram fragmentadas totalmente.

Entre as pelotas hidratadas na câmara úmida, aquelas expostas por 2 e 5 dias apresentaram maior quantidade de fragmentos grosseiros, o que indica um melhor desempenho destes lotes no ganho de resistência das pelotas individualmente (menor quebra volumétrica), que também é acompanhado melhores desempenhos em compressão a frio.

A maior dureza na região central das pelotas da câmara úmida é compatível com a presença de fragmentos mais grosseiros após o tamboramento das pelotas desse tipo, e indicam que a hidratação no ambiente saturado (câmara úmida) atinge regiões mais internas do aglomerado, promovendo um maior ganho de resistência volumétrica individual.

## 5. CONCLUSÕES

A análise que pode ser feita dos resultados dos ensaios nas pelotas autorredutoras mostraram que:

- A hidratação complementar realizada nas pelotas, independente do tempo e do meio, aumentou sua resistência a compressão;
- O aumento no tempo de imersão em água ou residência em câmara úmida, aumenta a resistência a compressão das pelotas até determinado ponto, que sendo ultrapassado, causa redução no aumento das propriedades finais das pelotas, caracterizando a existência de uma condição ótima de hidratação.
- A hidratação por meio de uma câmara úmida se mostrou mais eficiente que aquela por imersão em água. A média de resistência a compressão para o melhor tempo de imersão em água foi de 163 N, enquanto que para o melhor resultado de câmara úmida foi 218 N. As pelotas não hidratadas apresentaram média de 71N.
- A câmara úmida promove uma hidratação mais eficiente ao longo da pelota, gerando um ganho de resistência a quebra volumétrica mais relevante.
- O aumento da resistência a compressão é diretamente proporcional à resistência a quebra volumétrica das pelotas;



## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AUTORES DIVERSOS; “The Making, Shaping and Treating of Steel – Iron making Volume”; The AISE Steel Foundation, 11ª Edição, 1999.
- [2] NOLDIN Jr., J.H.; “Contribuição ao estudo da cinética de redução de briquetes auto-redutores”; Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, Rio de Janeiro – RJ, Brasil, 2002.
- [3] OSÓRIO E., VILELA A.C.F, SAMPAIO C.H; Estudo prospectivo do Setor Siderúrgico, Associação brasileira de Metalurgia e Materiais, ABM, Brasília – DF, Brasil, 2008.
- [4] DE BUZIN, P.J.W.K. Desenvolvimento de Briquetes Autorredutores a partir de Carepas de Processamento Siderúrgico para Utilização em Forno Elétrico a Arco. Porto Alegre, 2009. Dissertação de mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- [5] ABCM, Associação brasileira de cimento Portland - <http://www.abcp.org.br/>, acessado em 18/06/2013.
- [6] TAKANO, C., MOURÃO, M.B.; “Self-reducing pellets for ironmaking: mechanical behavior”; Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review: An International Journal, v. 24, N. 3-4, p.233-252, 2003.
- [7] GOKSEL, M.A., 1977, “Fundamentals of cold bond agglomeration process”, Proceedings of the 2nd International Symposium on Agglomeration, Agglomeration 77, and Editor: K.V.S. Sastry, Berkley, 3, pp. 877-900.
- [8] LEA, F.M., 1971, The Chemistry of Cement and Concrete. Chemical Publishing Company Inc., New York, 3rd edition.
- [9] Site: [www.vale.com](http://www.vale.com), acessado em 18/07/13.
- [10] METHA, P. K., 1986, Concrete Structure, Properties, and Materials. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, N. J.

- [11] GOKSEL, A., Coburn, J., and Kohut, J., 1991, “Recycling waste from iron-steel plants using PTC process, Ironmaking Conference Proceedings, ISS, pp. 97-112
- [12] D’ABREU, J.C.; MOURÃO, M.B.; COSTA, P.H. C; JÚNIOR, J.H.N.; MARCHEZE, E. – Curso de Auto-redução carbo-metalotérmica – 7 Simpósio Brasil-Japão, 2008.
- [13] NOLDIN Jr., J.H.; Tecnoored Process – Low cost Pig Iron Production \ Scrap Substitutes and Alternative Ironmaking IV. – Baltimore, MD : [s.n], 2004.
- [14] DUTTA, S.K., GHOSH, A.; “Study on non-isothermal reduction of iron ore-coal/char composite pellet”, Metallurgical and Materials Transactions B, v. 25B, N. 1, p.15-26, Fev. 1994.
- [15] KASAI, A., MATSUI, Y.; “Lowering of Thermal Reserve Zone Temperature in Blast Furnace by Adjoining Carbonaceous Material and Iron Ore”; ISIJ International, v. 44, N. 12, p.2073-2078, 2004.
- [16] MATSUI, Y., SAWAYAMA, M., KASAI, A., YAMAGATA, Y., NOMA, F.; “Reduction Behavior of Carbon Composite Iron Ore Hot Briquette in Shaft Furnace and Scope on Blast Furnace Performance Reinforcement”; ISIJ International, v. 43, N. 12, p.1904-1912, 2003.
- [17] KASAI, A., TOYOTA, H., NOZAWA, K., KITAYAMA, S.; “Reduction of Reducing Agent Rate in Blast Furnace Operation by Carbon Composite Iron Ore Hot Briquette”; ISIJ International, v. 51, N. 8, p.1333-1335, 2011 (Nota).
- [18] UEDA, S., YANAGIYA, K., WATANABE, K., MURAKAMI, T., INOUE, R., ARIYAMA, T.; “Reaction Model and Reduction Behavior of Carbon Iron Ore Composite in Blast Furnace”; ISIJ International, v. 49, N. 6, p.827-836, 2009.



- [19] MERKLIN, K. E.; CHILDS, M. H.; Some factors influencing the physical qualities of iron ore pellets. AIME, 1961.
- [20] YOKOYAMA, H., HIGUCHI, K., ITO, T., OSHIO, A.; “Decrease in Carbon Consumption of a Commercial Blast Furnace by Using Carbon Composite Iron Ore”; ISIJ International, v. 52, N. 11, p.2000-2006, 2012.
- [21] Site: [www.midrex.com](http://www.midrex.com), acessado em 17/06/2013.
- [22] LITSTER, J. D., WATERS, A. G., NICOL, S. K., Coke degradation by surface breakage in a modified tumble drum. Transactions ISIJ, vol 27, pp. 3 – 9, 1987.
- [23] D’ABREU, J.C.; MOURÃO, M.B.; COSTA, P.H. C; JÚNIOR, J.H.N.; MARCHEZE, E. – Curso de Auto-redução carbo-metalotérmica – 7 Simpósio Brasil-Japão, 2008.
- [24] MOURÃO, M.B., TAKANO, C.; “Self-reducing pellets for ironmaking: reaction rate and processing”; Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review: An International Journal, v. 24, N. 3-4, p.183-202, 2003.